

Федеральное государственное образовательное учреждение
высшего образования «Саратовский государственный аграрный университет
им. Н.И. Вавилова»

На правах рукописи

КАРПОВА ОЛЬГА ВАЛЕРИЕВНА

**УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЕ УСТРОЙСТВА
ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ДОЖДЕВАНИЯ
ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ «ФРЕГАТ»**

Специальность 06.01.02 – Мелиорация,
рекультивация и охрана земель

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

**Научный руководитель
доктор технических наук,
доцент Д.А. Соловьев**

Саратов – 2017

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛИВА ДМ «ФРЕГАТ».....	8
1.1 Состояние дождевальной техники в Саратовской области и тенденции ее изменения.....	8
1.2 Показатели качества полива дождевальной машиной «Фрегат» и способы их улучшения.....	11
1.3 Определение потерь воды при поливе дождевателями.....	15
1.4 Обзор устройств приповерхностного дождевания, устанавливаемых на дождевальные машины.....	22
1.5 Условия повышения равномерности полива.....	25
1.6 Выводы.....	28
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛИВА ДМ «ФРЕГАТ».....	30
2.1 Обоснование применения приповерхностного полива ДМ «Фрегат»..	30
2.2 Обоснование конструкционных особенностей дождевальной насадки и устройств приповерхностного дождевания для ДМ «Фрегат».....	37
2.3 Анализ методики расчета эпюр распределения дождя дождевальной насадкой.....	45
2.4 Выводы.....	52
3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ.....	54
3.1 Программа оценки работы модернизированных ДМ «Фрегат».....	54
3.2 Методика исследования агротехнических показателей полива дождевальными насадками.....	55
3.3 Лабораторно-полевые испытания модернизированных ДМ «Фрегат»..	61
3.4 Математическая обработка экспериментальных материалов и их статистическая оценка.....	71
3.5 Выводы.....	74
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ НАСАДКИ.....	76
4.1 Расход воды устройством приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой.....	76
4.2 Снижение давления воды по длине устройства приповерхностного	

дождевания сборного типа.....	78
4.3 Дальность полета струи при поливе дождевальной насадкой с обратным конусом.....	81
4.4 Средняя и мгновенная интенсивность дождя при поливе дождевальной насадкой и ее распределение вдоль ДМ «Фрегат».....	82
4.5 Крупность капель дождя, создаваемая дождевальными насадками с обратным конусом.....	86
4.6 Эпюры распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой с обратным конусом.....	93
4.7 Карты расстановки устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками на трубопроводах машин «Фрегат» различных модификаций.....	99
4.8 Выводы.....	100
5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДМ «ФРЕГАТ», ОБОРУДОВАННЫХ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ДОЖДЕВАНИЯ С ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ НАСАДКАМИ...	102
5.1 Расход воды и норма полива ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания.....	102
5.2 Потери воды на испарение и унос ветром при поливе ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания.....	108
5.3 Равномерность полива ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания.....	115
5.4 Оценка интенсивности дождя и энергетических показателей при поливе модернизированными ДМ «Фрегат».....	130
5.5 Влияние приповерхностного полива на влажность почвы и урожайность сельскохозяйственных культур.....	134
5.6 Надежность работы разработанных устройств приповерхностного дождевания и затраты на их изготовление.....	137
5.7 Экономическая эффективность внедрения устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками на ДМ «Фрегат»	139
5.8 Выводы.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	142
РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ.....	144
ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ.....	145
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	146
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	165

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Для обеспечения продовольственной безопасности Российской Федерации большое значение имеет Федеральная целевая программа развития мелиорации до 2020 г. В Саратовской области реализуется ряд проектов, которые позволят восстановить и значительно увеличить орошаемые площади. Введение в оборот орошаемых земель влечет за собой совершенствование имеющихся и создание новых дождевальных машин.

В Саратовской области широко используются ДМ «Фрегат», она имеет ряд преимуществ: возможность проводить, полив круглосуточно в автоматическом режиме; высокую производительность за счет обслуживания одним оператором 3–4 машин.

Однако серийные дождевальные аппараты и дефлекторные насадки, устанавливаемые на трубопровод ДМ «Фрегат», создают дождевое облако высотой подъема струи до 4...7 м от поверхности почвы, что приводит к значительным потерям воды на испарение и унос ветром и снижению равномерности полива при усилении ветра.

Известные устройства приповерхностного дождевания (УПД) имеют высокую стоимость, низкую надежность в работе, сложную регулировку, значительную трудоемкость при изготовлении, а также производстве монтажных и демонтажных работ.

Таким образом, совершенствование технологического процесса и технических узлов ДМ «Фрегат» для повышения качества полива и равномерного распределения дождя, снижения потерь воды на испарение и унос ветром является актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы. Вопросами совершенствования дождевальных машин, дождеобразующих устройств и технологий орошения, занимались ученые: Ф.К. Абдразаков, Н.П. Бредихин, Д.П. Гостищев, Ю.И. Гринь, К.В. Губер, С.Х. Гусейн-Заде, Н.С. Ерхов, А.П. Исаев, Б.М. Лебедев, Г.П. Лямперт, В.Ф. Носенко, Г.В. Ольгаренко, В.И. Ольгаренко, Н.Ф. Рыжко, А.И. Рязанцев, В.В.

Слюсаренко, Ю.Ф. Снопич, Б.П. Фокин, и др. Анализ опубликованных материалов показал, что необходима разработка новых дождевальных насадок и устройств приповерхностного дождевания, которые обеспечат повышение показателей качества полива при низкой стоимости их изготовления.

Цель исследований – повышение эффективности полива дождевальной машиной «Фрегат» на основе совершенствования конструктивно-технологических параметров дождевальной насадки и устройств приповерхностного дождевания.

Задачи исследования:

– провести исследования технологического процесса приповерхностного полива и определить конструктивно-технологические параметры дождевальной насадки и устройств приповерхностного дождевания;

– определить математические зависимости показателей качества полива ДМ «Фрегат» с усовершенствованными устройствами приповерхностного дождевания и уточнить методику расчета эпюр распределения слоя дождя дождевальной насадкой;

– экспериментально исследовать ДМ «Фрегат» с усовершенствованными устройствами приповерхностного дождевания с насадками;

– дать оценку экономической эффективности работы ДМ «Фрегат», оборудованной устройствами приповерхностного дождевания.

Научная новизна заключается в том что:

– разработаны и обоснованы усовершенствованные конструкции устройств приповерхностного дождевания и дождевальная насадка с обратным конусом, улучшающие качества полива;

– уточнены математические зависимости технологического процесса полива ДМ «Фрегат» от ее технических параметров и метеорологических факторов;

– усовершенствована методика расчета эпюры распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой.

Теоретическая и практическая значимость работы. Обоснован технологический процесс полива усовершенствованными устройствами приповерхностного дождевания, установленными на дождевальную машину «Фрегат», уточнены

закономерности дождеобразования и определены агротехнические показатели полива в зависимости от конструктивно-технологических характеристик дождевальной насадки.

Модернизированные конструкции ДМ «Фрегат» и ресурсосберегающие технологии полива внедрены на орошаемых участках Саратовской области. Результаты исследований использованы в ООО «АгроТехСервис» (г. Маркс), ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» и др.

Методология и методы исследования. В работе были использованы теоретические методы исследований – математическое моделирование, системный анализ качественных и агротехнических параметров дождевания, обоснование закономерностей технологического процесса полива на основе известных законов физики, классической механики и математического анализа. Экспериментальные методы содержат полевые исследования агротехнических и энергетических характеристик полива различными дождевателями и усовершенствованными ДМ «Фрегат» по СТО АИСТ 11.1–2010. Водно-физические свойства почвы и урожайность сельскохозяйственных культур при поливе среднеструйными дождевальными аппаратами, серийными дефлекторными насадками и устройствами приповерхностного дождевания определялись по общепринятой методике полевого опыта Б.А. Доспехова (1985). Экономическая оценка сельскохозяйственной техники выполнялась по ГОСТ Р 53056–2008.

Положения, выносимые на защиту:

- конструктивно-технологические параметры дождевальной насадки с обратным конусом и устройств приповерхностного дождевания;
- теоретическое обоснование совершенствования технологического процесса приповерхностного полива и математические зависимости показателей качества полива дождевальной насадки с обратным конусом от ее конструктивно-технологических параметров;
- результаты экспериментальных исследований показателей качества полива ДМ «Фрегат» с усовершенствованными устройствами приповерхностного дождевания и дождевальными насадками.

Степень достоверности и апробация результатов подтверждается достаточным объемом опытных данных, полученных с соблюдением необходимого числа повторений, использованием методов статистического анализа и обработки опытных данных.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались:

- на ежегодных научных конференциях профессорско-преподавательского состава в Саратовском ГАУ (2014–2017);
- на Международной научно-технической конференции ФГБНУ ВНИИЗМ, г. Тверь (2016);
- на Международной научно-технической конференции ФГБНУ «РосНИИПМ», г. Новочеркасск (2016–2017);
- на Международной научно-практической конференции ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», г. Энгельс (2016);
- на Международной научно-технической конференции ВНИИ «Радуга», г. Коломна (2016).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 14 печатных работ, в том числе 4 – в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ, 2 патента на полезную модель и патент на изобретение. Общий объем публикаций – 3,66 п. л., из них 2,44 п. л. принадлежит лично автору.

Структура и объем работы. Диссертационная работа изложена на 197 страницах, включает 40 таблиц, 54 рисунка и состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Список литературы включает 184 источников, в том числе 16 на иностранном языке.

1 АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПОЛИВА ДМ «ФРЕГАТ»

1.1 Состояние дождевальной техники в Саратовской области и тенденция ее изменения

Континентальный климат Саратовской области характеризуется засушливостью и большой изменчивостью год от года. Особенно ярко частые засухи, когда выпадает минимальное количество осадков, наблюдаются в Заволжье. Недостаточное и резко меняющееся увлажнение в период вегетации растений не позволяет эффективно вести сельское хозяйство.

В связи с потеплением климата, усиливающейся засушливостью, необходимостью развивать сельское хозяйство в условиях экономических санкций проблема повышения обеспеченности водой земель Заволжья становится актуальной.

Площадь орошаемых земель Саратовской области за период с 1966 по 1987 г. увеличилась с 32,0 до 481,4 тыс. га (рисунок. 1.1).

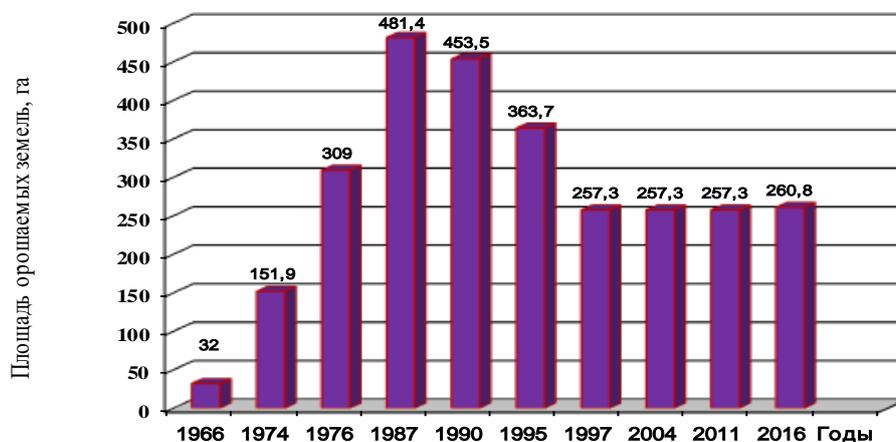


Рисунок 1.1 – Площадь орошаемых земель Саратовской области

Однако ошибочная политика 90-х годов и сокращение финансирования привели к потере почти половины орошаемых земель. Так, уже в 1997 г. площадь орошения составила 257,3 тыс. га. Такое снижение продолжалось до 2011 г. В настоящее время началось возрождение мелиорации, что вызвало увеличение площади орошения до 262 тыс. га.

Изменились также состав и типы технических средств полива (таблица 1.1). Вначале создания мелиоративного комплекса в основном использовались дальне-струйные машины ДДН-45, ДДН-70 и 2-консольные агрегаты ДДА-100. С начала 70-х годов в Саратовской области начали применять широкозахватные дождевальные машины: «Фрегат», «Волжанка» и «Днепр», в конце 80-х – дождевальные машины нового поколения «Кубань». С 1987 г. парк поливной техники насчитывал 7,9 тыс. дождевальных машин. Общая доля дождевальных машин составляла 87,5 % («Фрегат» – 34,2 %, «Волжанка» – 49,3 %, «Днепр» – 3,9 %) [92].

Сокращение финансирования в 90-е годы привело к остановке производства новых дождевальных машин. Предприятия-производители дождевальной техники или закрылись, или перепрофилировались на выпуск другой продукции.

За 25 лет состав многоопорных машин «Фрегат» уменьшился с 2996 до 480, но остается базовым в структуре комплекса дождевальных машин области (таблица 1.1, рисунок 1.2) и составляет 76,3 % от их общего количества [92]. Между тем, данные машины обладают высокой производительностью и степенью автоматизации, а также характеризуются надежностью работы базовых оцинкованных узлов и деталей (тележка, трубопровод, неподвижная опора и др.). Такие преимущества дождевальных машин «Фрегат» обеспечили их высокую долю и в мелиоративном комплексе России, которая составила 41,8 % [108].

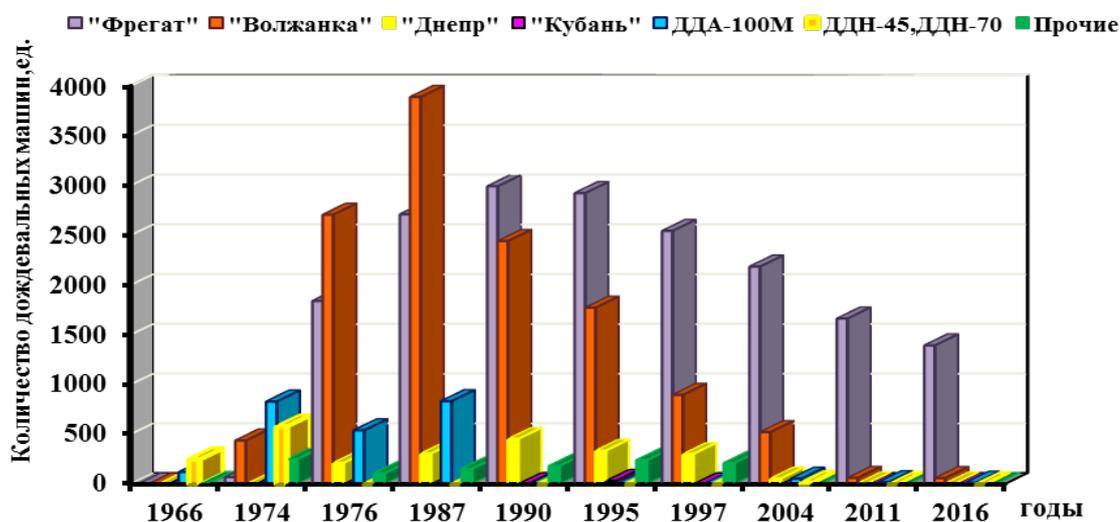


Рисунок 1.2 – Состав дождевальных машин в Саратовской области

Таблица 1.1 – Состав технических средств полива в Саратовской области

Показатели	Годы									
	1966	1974	1976	1987	1990	1995	1997	2004	2011	2016
Площадь орошаемых земель, га	32	151,9	309,0	481,4	453,5	363,7	257,3	257,3	257,3	260,8
Наличие дождевальных машин:	385	2989	5421	7907	6085	5316	3964	2839	1773	1773
«Фрегат»	–	72	1843	2714	2996	2927	2547	2188	1666	1666
«Волжанка»	–	440	2710	3893	2445	1775	899	524	64	60
«Днепр»	–	–	215	309	456	338	304	58	10	9
«Кубань»	–	–	–	–	3	33	–	–	–	2
ДДА-100М	124	832	542	835	–	–	–	56	20	12
ДДН-45, ДДН-70	248	581	–	–	–	–	–	13	–	–
Прочие	13	253	111	156	185	243	214	–	–	4

Анализируя состав парка дождевальных машин, можно сделать вывод о том, что в Саратовской области и в целом по Российской Федерации эксплуатируется значительное количество ДМ «Фрегат», несмотря на приобретение сельхозпредприятиями новой техники, как правило, зарубежного производства. В связи с этим задача усовершенствования и модернизации узлов и деталей машины «Фрегат» является актуальной и требует научного подхода.

1.2 Показатели качества полива дождевальной машиной «Фрегат» и способы их улучшения

Дождевальные машины «Фрегат» эксплуатируются в Российской Федерации продолжительное время, вследствие чего накоплен большой экспериментальный материал по исследованию качества полива. Один из важнейших агротехнических показателей эксплуатации дождевальных машин – равномерность распределения воды по орошаемой площади, которая оценивается коэффициентом эффективности полива $K_{эф.п}$. Многочисленные исследования [14, 37, 69, 85, 86, 132] показывают, что $K_{эф.п}$ зависит от конструктивно-технологических параметров дождевальных машин и климатических факторов и изменяется от 0,27 до 0,89.

При правильной настройке дождевальных аппаратов машины «Фрегат» (данные ВНИИМиТП) равномерность полива имеет высокие значения от 0,57 до 0,88 [86], а $K_{эф.п}$ уменьшается с усилением скорости ветра.

При встречном и попутном ветре наблюдается значительное сокращение поливной площади и степени перекрытия струй, в результате чего заметно снижается равномерность полива.

Согласно исследованиям, проведенным в «АзНИИГиМ» [37], установлено, что коэффициент эффективности полива $K_{эф.п}$ изменяется от 0,76 до 0,86.

Потери воды на испарение и унос ветром впервые были проанализированы в работах [24, 150, 152], где обозначалось, что такие потери растут с увеличением высоты подъема дождевого облака.

При изучении принципов образования дождевого облака и его влияния на разрушение структуры почвы [123] было установлено, что средний диаметр капель дождя изменяется от 0,7 до 2,4 мм.

Испытания ДМ «Фрегат», проведенные в Липецкой области [125], показали, что равномерность дождевания недостаточная, а коэффициент эффективности полива изменяется от 0,413 до 0,442. Значительное влияние на $K_{эф.п}$ оказывает направление ветра и его скорость, а также рельеф поля.

В хозяйствах, где снижено качество настройки дождевальных аппаратов машины «Фрегат», коэффициент эффективности полива невысокий – 0,23–0,47 [14].

Сотрудники «ВолжНИИГиМ» в Саратовской области при исследовании машин «Фрегат» [58, 131] установили, что без требуемой настройки дождевальных аппаратов коэффициент эффективности полива $K_{эф.п}$ – низкий (0,372), а с хорошо отрегулированными аппаратами – высокий (0,71–0,77). В тоже время на пролетах во второй половине машины, где наблюдается хорошее перекрытие струй, уменьшение частоты вращения аппаратов и степени распыления дождя, коэффициент эффективности полива достигает 0,95, что говорит о резерве его увеличения. С усилением скорости ветра до 4,0 м/с $K_{эф.п}$ снижается до 0,535 [132].

Анализ технологического процесса полива машиной «Фрегат», проведенный нами совместно с учеными ВолжНИИГиМа. Позволил сделать вывод, что на равномерность его влияют следующие показатели: скорость и направление ветра; степень дисперсности струй и их перекрытия; частота вращения аппаратов; правильность их настройки на расход воды; колебания давления в закрытой сети; изменчивость рельефа поля; формы эпюр дождя вдоль радиуса полива и др.

В начале машины «Фрегат» средняя интенсивность дождя колеблется от 0,06 до 0,12 мм/мин и усиливается в конце машины на 0,46 мм/мин при слабом ветре [3, 23, 24, 71, 86]. При использовании среднеструйных аппаратов ДМ «Фрегат» средняя действительная интенсивность дождя изменяется вдоль трубопровода от 1,4 до 2,5 мм/мин.

Ученые ВНИИТиП (г. Коломна) установили, что в начале машины «Фрегат» средний диаметр капель дождя составляет 0,2...0,4 мм, а в конце – увеличивается до 1,6...2,2 мм [86].

Средняя крупность капель, согласно исследованиям Ю.С. Пунинского и К.В. Губера [125], при поливе машиной «Фрегат» составляет 0,8...1,0 мм, а наибольшая – 2,8 мм.

Испытаниями [163, 165] выявлено, что диаметр капель дождя при поливе машиной «Фрегат» изменяется относительно ее трубопровода от 0,5 до 1,9 мм, согласно исследованиям [23, 24, 26], диаметр капель колеблется от 0,4 до 2,8 мм.

Существенное энергетическое воздействие на почву и сельскохозяйственные культуры оказывают размер капель, мощность дождя и кратность поливов. Это вызывает образование луж на поле и перераспределение оросительной воды по элементам микрорельефа. При повторном поливе в центре машины «Фрегат» образовавшийся сток составляет 13–17 %, в конце трубопровода он увеличивается до 16–22 % [86]. В середине трубопровода поливная норма до стока снижается с 63 до 54 мм, в конце машины она не более 25 мм.

В конце машины «Фрегат», согласно исследованиям П.И. Кузнецова [71], где интенсивность дождя 0,55...0,60 мм/мин, размер стока увеличивается с 8 до 11 % при первом и с 21 до 33 % при пятом поливе. В Волгоградской области на светло-каштановых почвах поливная норма до стока в конце машины составляет 22...34 мм.

Исследования, проведенные в условиях Куйбышевского Заволжья, показали, что объем стока повышается по мере приближения к концу машины, а также с увеличением кратности поливов [59, 60, 65]. В Саратовской области аналогичные результаты получены учеными ВолжНИИГиМа (полив машиной «Фрегат» темно-каштановых и каштановых почв [132]).

В работах [71, 86] установлено, что при поливе аппаратами № 3 и № 4 мощность дождя усиливается, что вызывает разрушение структуры почвы.

Значительное уплотнение почвы и образование на ней корки приводит к снижению поливной нормы до стока [43, 45].

Потери воды при поливе, согласно исследованиям [23, 25, 89, 104, 150, 163–165], достигают 22–33 %. По В.Я. Чичасову, В.Н. Черноморцеву и А.М. Абрамову [3, 158], они составляют 10–15 %, по В.Е. Хабарову [152, 153], – не более 5 %, по А.А. Рачинскому и В.К. Севрюгину [129], – 1–2 %.

На Украине при испытаниях машин «Valley» потери воды оказались более значительными – 32,4–38,5 % [37].

Исследования, проведенные М.С. Мансуровым в Азербайджане, показали, что с переводом коротко - к дальнеструйному дождеванию потери воды увеличиваются с 7–8 до 9–10 % [78].

В ВолжНИИГиМе были выполнены работы по изучению оптимального режима распыления струи и угла вылета ее из дождевальных аппаратов и их модернизации. Эти исследования привели к улучшению агротехнических показателей полива ДМ «Фрегат», повышению его равномерности и уменьшению потерь воды на испарение и унос ветром [131, 132].

Важным направлением увеличения результативности применения ДМ «Фрегат» является дождевание. В ВолжНИИГиМе учеными под руководством Н.Е. Чубикова проведены исследования по переводу дождевальных машин типа ДДА-100МА, «Кубань», «Фрегат» и «Кубань-ЛК» на приповерхностный полив [92].

Первые исследования показали, что приповерхностное дождевание снижает потери воды на испарение и унос ветром в среднем с 16–21 до 4–10 % и повышает равномерность полива с 0,31–0,53 до 0,72–0,77. Однако разработанные устройства приповерхностного дождевания отличались большой металлоемкостью, низкой надежностью в эксплуатации и сложностью в изготовлении. Монтажные и демонтажные работы также характеризовались сложностью и трудоемкостью [132].

Анализируя многочисленные исследования показателей качества полива, можно сделать вывод о его неравномерности при использовании серийных аппа-

ратов, особенно при ветровой нагрузке, и о значительных потерях воды в результате уноса ветром и испарении. Необходимо также отметить, что крупность капель дождя и его высокая интенсивность при работе среднеструйных аппаратов в конце машины приводят к стоку и как следствие – к возникновению эрозионных процессов в почве при поливе.

Именно приповерхностное дождевание позволяет снизить негативное влияние перечисленных факторов на почву и повысить качества полива на дождевальных машинах. В связи с этим актуальной задачей является определение таких конструктивно-технологических параметров устройств приповерхностного дождевания, которые приведут к повышению качества полива и снижению потерь воды на испарение и унос ветром.

1.3 Определение потерь воды при поливе дождевателями

Одним из первых теоретическое исследование, направленное на определение потерь воды, на испарение при полете капель дождя за время их падения и унос ветром, провел Е.Г. Зак [147], который установил формулу для расчета времени полного испарения капли:

$$T = \frac{176,4d^2}{(1+1,92v)Д}, \quad (1.1)$$

где T – время испарения капли, мин;

d – диаметр капли, мм;

v – скорость ветра, м/с;

$Д$ – дефицит упругости пара, мм.

Используя формулу (1.1), И.Д Федоренко установил зависимость для расчета потерь воды на испарение [150]:

$$E = 100 \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{Д_{\tau} t (1 + 1,92v)}{10584d^2} \right)^{1,5} \right]. \quad (1.2)$$

Из формулы (1.2) видно, что испарение капли пропорционально времени t ее полета, дефициту упругости пара D_v , скорости ветра v и обратно пропорционально квадрату диаметра капли d .

По расчетам И.Д. Федоренко [150], при падении капли диаметром 0,5 мм с высоты 4 м при скорости ветра 3 м/с температуре воздуха 30⁰С и дефиците упругости пара 60 % потери воды на испарение составляют 10 %, а с высоты 12 м – 20 %. Согласно [146], при падении капли с высоты 4 и 12 м при увеличении температуры воздуха до 40⁰С и дефиците упругости пара 70 % они будут выше – 20 и 38 % соответственно.

Многочисленными исследованиями в области опрыскивания растений установлено, что чем меньше диаметр капли, тем меньше скорость ее падения и тем быстрее она испаряется. По данным Ж.Р. Дидио [146], при ветре происходит унос капель дождя, который может достигать значительной величины 250...4000 м (таблица 1.2).

Таблица 1.2 – Скорость падения, время оседания и величина уноса капли в зависимости от ее диаметра

Диаметр капли, мкм	Конечная скорость падения, см/с	Время оседания капли, с	Величина уноса, м	
			X_1	X_2
1000	400,0	0,8	0,8	3,2
500	220,0	1,3	1,3	5,2
200	72,0	4,2	4,2	16,8
100	26,0	11,5	11,5	46,0
50	7,0	43,0	43,0	172,0
20	1,2	250,0	250,0	1000,0
10	0,3	1000,0	1000,0	4000,0

Примечание. X_1 и X_2 – величина уноса капли определена при высоте падения 3 м и скорости ветра 1,0 и 4,0 м/с соответственно.

Капля воды диаметром 100 мкм полностью испарится, пролетев порядка 6 с, т.е. не долетев до земли (время оседания 11,5 с) при температуре воздуха 25⁰С и относительной влажности 30 % [146].

Важный показатель эксплуатации поливной техники – потери воды на испарение и унос ветром, которые при дождевании изменяются от 0,4 до 65 % от израсходованного объема воды [152, 153, 154].

Большая разность опытных результатов (от 1–2 до 65 %) обусловлена разными методами исследований и замеров.

Потери воды при дождевании определяют:

- методом водного баланса – по величине воды в дождемерах [115];
- методом расчета влажности почвы до и после поливов [18].

Потери дождя за время полета капель изучают:

- методом реактивных индикаторов [89];
- методом измерения концентрации солей натрия или хлора в воде дождеприемного устройства [3, 26, 103, 137, 165].

На потери капель дождя значительно влияют метеорологические факторы. Для Саратовского Заволжья характерно лето с высокой температурой окружающей среды и низкой относительной влажностью. Во время вегетационного периода температура воздуха изменяется от 13 до 34⁰С (в среднем составляет 17,4 °С). Относительная влажность воздуха – от 96 до 16 % (в среднем 59 %); скорость ветра – от 0 до 6...8 м/с (в среднем 3,7 м/с) на высоте 2 м от поверхности почвы [30, 104] приложение Б.

При дождевании испарение воды с поверхности капли $E_{и}$, которое определяют по разности концентрации солей, составляет:

- от 5 до 12,3 % для среднеструйных аппаратов [89];
- 4,5 % для ДКШ-64 «Волжанка» [158];
- 4,0 % для ДКШ-64 «Волжанка» [137];
- до 5 % для ДКШ–64 [152, 153];
- до 13,7 % для короткоструйных насадок и до 14,5 % для дальнеструйных аппаратов [78];
- 0,7 % для дождевальных аппаратов «Райн-Бард» [28].
- от 6 до 32 % для ДДА-100М [163].

Величина $E_{и}$ изменяется от 5,0 % (для аппаратов № 4 на машине «Фрегат») до 25 % при скорости ветра 3,8 м/с [25].

Завышенные данные можно объяснить тем, что автор проводил замеры концентраций ионов натрия в оросительной воде на поверхности почвы из дождемеров, которые продолжительное время стояли на площадке. При этом происходило дополнительное испарение воды.

Некоторые авторы указывают на очень небольшие потери воды при уносе ветром за время полета капель дождя. Так, по данным А.А. Рачинского и В.К. Севрюгина [128], они изменялись от 0 до 1,4 % (полив дальнеструйной машиной ДДФ в условиях Средней Азии). В расчетах взят средний диаметр капель 1,3 мм и не учитывается «водяная пыль», которая падает в течение нескольких минут и может полностью испариться, не долетев до поверхности земли.

Исследования, проведенные в Саратовской области, показали, что потери воды на испарение капель в воздухе при поливе аппаратами ДМ «Фрегат» составляют 0–7 % (в среднем 3,5 %) (таблица 1.3) [92].

Таблица 1.3 – Потери воды на испарение $E_{и}$ капель в воздухе при поливе аппаратами ДМ «Фрегат» (АО «Энгельское»)

Тип аппарата	Диаметр насадки, мм	Потери воды на испарение $E_{и}$, %	Условия опыта
4	11,1	1,77	Конец струи
4	5,5	5,13	Дефлекторная пластина
3	5,6	0	Конец струи
3	5,6	0,68	–
4	10,3	4,83	27°
4	10,3	0	15°
4	9,5	2,77	–
4	5,6	0,03	15°
3	7,1–5,6	7,18	27°
3	7,9	4,07	–
3	7,9	4,43	15°
3	5,5	9,50	Дефлекторная пластина

Примечание. 15° – угол вылета струи.

В таких опытах было трудно уловить мелкие капли («водяную пыль»), которые уносятся на расстояние 100...300 м и испаряются, не достигнув поверхности почвы.

Для практических опытов наиболее важна суммарная величина потерь воды на испарение капель в воздухе и унос $E_{и.у}$ ветром за пределы поля, которая определяется объемным методом по разности между расходом воды аппаратом и фактической нормой полива на поле. Эту величину изучали не только в нашей стране [55, 57, 60, 78, 89, 93, 94, 110, 115, 152–154], но и за рубежом: в США [138], Германии [174], Болгарии [175], Нигерии [171].

Суммарные потери при поливе одним аппаратом (насадкой), как правило, больше, чем по машине в целом. При поливе дождевальным аппаратом суммарные потери изменялись от 14,1 до 25,2 % (при температуре 24,3 и 24,8⁰С, относительной влажности воздуха 48,8 и 61,0 %, скорости ветра 0,1 и 2,4 м/с) [115].

Во время полива дефлекторной насадкой суммарные потери воды при усилении скорости ветра до 3 м/с увеличились с 13,7 до 20,7 %, дальнеструйным аппаратом – с 14,5 до 23,3 % [78].

Исследованиями М.И. Назарова в Киргизии [93, 94] установлено, что суммарные потери воды при дождевании дефлекторной насадкой КДУ-55 в среднем составляют 18 %, среднеструйным аппаратом СДА-2 – 20 %, дальнеструйным аппаратом ДДУ-48 – 23 %. Однако они могут увеличиваться соответственно до 27, 30, 35 %.

По данным М.К. Мустафаевой [89], потери воды на Апшеронском полуострове при скорости ветра 9 м/с достигают 28 %. Потери воды на испарение и унос ветром при скорости 6,0 м/с в Шамхорском районе составили 19 %. Тесная связь между процессами испарения, уноса капель и метеорологическими факторами подтверждается практически всеми исследованиями.

Потери воды также увеличиваются с повышением высоты подъема струй дождя над поверхностью почвы, что хорошо прослеживается в исследованиях М.И. Назарова и М.С. Мансурова [78, 93].

С ростом числа действующих насадок суммарные потери обычно несколько меньше, чем при использовании отдельно работающих дождевателей, что связано с повышением интенсивности дождя и величины перекрытия струй при поливе.

При поливе ДДА-100 МА испарение возрастает от 9 до 30 % при повышении дефицита влажности от 1 до 13 мм [55]. В дневные часы испарение составляет 22,4 %, что примерно в 2 раза больше, чем при ночных поливах.

Суммарные потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у}$ при работе ДМ «Волжанка» в Волгоградской области изменялись от 2,9 до 15,6 % [110] (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Потери воды при поливе ДМ «Волжанка»

Температура, °С	Дефицит влажности воздуха, мб	Скорость ветра, м/с	Суммарные потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у}$, %
12,1	9,1	3,1	2,9
22,8	16,2	1,6	8,5
27,2	18,4	2,3	15,4
23,4	16,5	3,2	15,6
25,6	17,5	1,7	5,2

По данным С.Х. Гусейн-Заде [37], потери воды при работе ДМ «Волжанка» (скорость ветра 1...2; 1,5...2; 2...3; 3...5 м/с) составили: 13,7; 13,3; 17,6; 19,0 %.

При работе ДМ «Valley» (исследования на юге Украины) [37] потери воды на испарение и унос ветром достигали 31,3–38,3 %. Согласно исследованиям, проведенным ВНИИМиТП [88], эти потери в среднем составили 28 %.

Потери воды на испарение и унос ветром можно рассчитать по различным зависимостям. Во ВНИИ «Радуга» [81] получена формула:

$$И = (0,71 + 0,15v) (1 - Q/100)T, \quad (1.3)$$

где И – потери воды на испарение %;

v – скорость ветра, м/с;

Q – относительная влажность воздуха %;

T – температура воздуха, °С.

Назаров М.И. [93], проводивший испытания в Киргизской ССР, предложил для расчёта потерь воды на испарение и унос ветром следующее уравнение:

$$E_{ис} = 80(vr^{-1})^{0,33}, \quad (1.4)$$

где $E_{ис}$ – потери воды на испарение и унос ветром %;

v – скорость ветра, м/с;

r – относительная влажность воздуха %.

Хабаровым В.Е. [152] предложено уравнение для определения потерь воды на испарение в зависимости от коэффициента напряженности метеорологических факторов Φ (ДМ «Фрегат», ДДА-100 М, ДДН-70 и ДКШ-64 «Волжанка»). При работе ДМ «Фрегат» зависимость $E_{ис}$ от температуры воздуха T , относительной влажности воздуха φ и скорости ветра v_b имеет вид:

$$E_{ис} = 0,206[T(1 - \varphi/100)(v_b + 1)]^{0,81} = 0,208\Phi^{0,81}, \quad (1.5)$$

где Φ – коэффициент напряженности метеорологических факторов.

Ивановым В.А. [49] получено уравнение для определения $E_{ис}$, в котором учтены: давление P , диаметр струи d , высота подъема дождевого облака h , дефицит влажности воздуха D , температура воздуха T и скорость ветра v_b (условия Волгоградской области):

$$E_{ис} = D^{0,5}P^{0,6}d^{0,26} \cdot 0,9 + 0,45h + 0,2(T - 20) + 2(v_b - 2). \quad (1.6)$$

Уравнение (1.6) не учитывает значения среднего диаметра капель, а приводимые величины среднего диаметра струи и высоты ее подъема над почвой вызывают сомнение.

В настоящее время накоплен большой экспериментальный материал по определению потерь воды при поливе дождеванием различными типами машин и их расчете в зависимости от метеорологических факторов. Однако пока нет общей формулы, в которой бы учитывались как метеорологические факторы, так и конструктивно-технологические параметры рабочих органов и машин.

Анализ проведенных исследований показал, что одним из направлений уменьшения потерь воды на испарение и унос ветром является снижение высоты подъема дождевого облака над поверхностью почвы за счет применения уст-

ройств приповерхностного дождевания и ветроустойчивых дождевателей. Поэтому необходимо определить эффективность различных конструкций приповерхностного дождевания для снижения потерь воды на испарение и унос ветром с целью их усовершенствования. При этом важно улучшить показатели качества полива: средний диаметр капель и скорость их падения, равномерность распределения воды на орошаемой площади, интенсивность дождя и др.

1.4 Обзор устройств приповерхностного дождевания, устанавливаемых на дождевальные машины

Многочисленные исследования и опыт эксплуатации зарубежных дождевальных машин показывают, что применение устройств приповерхностного дождевания является основным направлением улучшения агротехнических показателей полива.

Первые разработки конструкций УПД для ДМ типа «Фрегат», «Кубань-М», «Кубань-ЛК» были проведены в ВолжНИИГиМе. Известны разработки УПД для многоопорных машин, которые выполнены во ВНИИМиТП, в Австрии, США и других странах. Большинство выпускаемых в настоящее время многоопорных дождевальных машин комплектуется устройствами приповерхностного дождевания.

Схемы различных конструкций УПД для ДМ «Фрегат» представлены на рисунке 1.3. Устройства, разработанные в 1978, 1983 г. (рисунок 1.3, *а*), представляли собой три дополнительных полиэтиленовых трубопровода, которые монтировались на каждом пролете машины. Подача воды в УПД осуществлялась из водопроводящего трубопровода машины. Высота установки устройства регулировалась от 0,6 до 2,0 м от поверхности почвы в зависимости от высоты сельскохозяйственных культур. Для полива использовались короткоструйные насадки, которые устанавливали на дополнительные полиэтиленовые трубопроводы или поливные шланги.

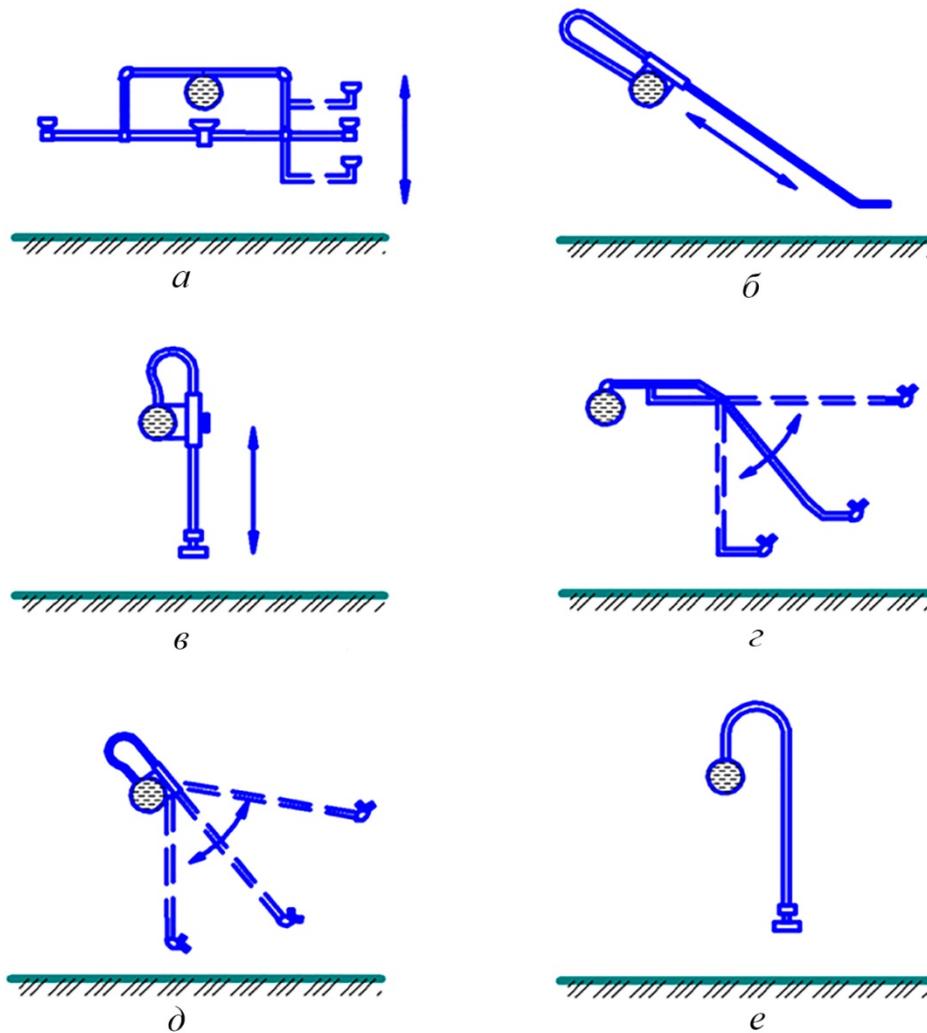


Рисунок 1.3 – Принципиальные схемы устройств приповерхностного дождевания для ДМ отечественного («Фрегат», «Кубань-М» и «Кубань-ЛК») и зарубежного производства: *a* – дополнительные трубопроводы вертикального перемещения; *б* – штанга наклонного перемещения; *в* – штанга вертикального перемещения; *г* – рычажного типа; *д* – рычажного типа с поворотом вокруг трубопровода машины; *е* – типа «сборная штанга»

Исследования [92] показали, что УПД данного типа отличаются сложностью конструкции, большой массой, значительными затратами на изготовление и монтажно-регулирующие работы. Пластмассовые трубы при высоких температурах окружающей среды деформируются, что не позволяет насадкам сохранять стабильное вертикальное положение. Небольшой диаметр насадок на пролете трубопровода значительно снижает проходное сечение сопла, что повышает его засоряемость мусором при подаче воды из открытых каналов.

На УПД штангового типа трубы-штанги перемещаются относительно трубопровода машины под углом (рисунок 1.3, б) [83], а подача воды производится из полиэтиленовых водоподводящих труб. На штанге установлена секторная насадка с углом вылета струи 6–11 град. к горизонту. Данное устройство не нашло широкого применения из-за большой материалоемкости. Масса УПД штангового типа (рисунок 1.3, в), перемещающихся по вертикали, также значительная [84]. Данные УПД снабжены дождевальными аппаратами с отражательными пластинами, которые, работая в перевернутом положении, имеют низкую надежность.

Устройства приповерхностного дождевания рычажного типа (рисунок 1.3, з) состоят из напорного рукава и трубки, на которой установлены дождевальные аппараты или дефлекторные насадки. Подобная конструкция имеет меньшие гидравлические сопротивления при использовании напорных рукавов и благодаря установке насадок увеличивает ширину захвата дождем до 2,5 м от трубопровода машины. В результате эксплуатации выявлен ряд недостатков: снижение жесткости крепления дождевателя и прекращение его вращения [92].

Одна из последних разработок – УПД рычажного типа с поворотом вокруг трубопровода машины [114] (рисунок 1.3, д), которое при помощи хомута закрепляют на трубопроводе. Высота установки дождевателя над поверхностью почвы изменяется от 0,6 до 2,5 м за счет отворачивания гаек болтов и поворачивания устройства относительно трубопровода. Для подачи воды использован высоконапорный рукав, более гибкий и меньших размеров. К недостаткам данной конструкции УПД относятся: сложность изготовления хомута и его недостаточная надежность крепления на трубопроводе машины. Устройства рычажного типа имеют возможность размораживания нижних металлических труб и фитингов в результате зимнего замерзания остатков оросительной воды. Коррозия резьбовых соединений вызывает затруднения при регулировке вертикального положения УПД уже к концу первого поливного сезона.

Зарубежные устройства приповерхностного полива (Австрия, США и другие страны) обладают однотипной конструкцией (рисунок 1.3, е) и представляют со-

бой гибкую напорную трубу, в нижней части которой установлена короткоструйная насадка. Отсутствие плавной высоты установки устройства над поверхностью почвы – основной недостаток конструкции данного типа. Рабочие органы монтируются ниже ферменного пролета машины на постоянной высоте 2,7...3 м от почвы для высокостебельных культур или 1,0...1,5 м для овощных культур.

Таким образом, анализ конструкций УПД, устанавливаемые на различные дождевальные машины, показывает, что они имеют значительные недостатки – большую стоимость, излишнюю металлоемкость, сложность в изготовлении, недостаточную надежность в работе, трудность осуществления монтажных и демонтажных работ. Большинство известных дождевателей при поливе (особенно аппараты) создает дополнительный реактивный момент во время полива, что может вызвать поломку стальных труб. Вода после поливов остается в нижней части УПД, которая зимой замерзает и размораживает чугунные угольники. Поэтому необходимо разработать новую дождевальную насадку, которая бы при высоких агротехнических показателях полива обеспечивала слив воды из устройства приповерхностного дождевания и минимизировала реактивный момент при выходе струи из сопла.

1.5 Условия повышения равномерности полива

В настоящее время вопросы расчета эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива дождевателями недостаточно исследованы. Изучением их занимались Б.М. Лебедев [75], С.П. Казаков [53], И.Д. Федоренко [149], А.Г. Васильев и Б.А. Васильев [16, 17], А.А. Калашников [54] и др.

К первым исследованиям эпюр дождя при поливе короткоструйными насадками относятся работы, выполненные в ВНИИГиМе Д.И. Федоренко [149], который анализировал равномерность полива в зависимости от давления, диаметра сопла и конструктивных особенностей насадки.

Наилучшее распределение дождя на поле дефлекторными насадками принимается при их расположении:

– по схеме равнобедренного треугольника со сторонами $A = 1,6R$; на высоте $h = 1,4R$ [53];

– по квадратной схеме, когда насадки целесообразно размещать на расстоянии $A = h = 1,41R$;

– по схеме равностороннего треугольника, при этом расстояние между насадками должно быть: $A = 1,7R$ и высота $h = 1,5R$.

Аналогичные рекомендации имеются и для дальнеструйных дождевальных машин [74]. Исследованиями Д.С. Павловского [112] для ДДН-70 определено оптимальное расстояние между каналами 90 м и гидрантом 100 м. Эти расстояния и показатели качества полива для дождевателя ДДН-70 были получены на основе моделирования, на ЭВМ «Минск-32» экспериментальной эпюры дождя.

За рубежом также выполнены аналогичные работы. Болгарские исследователи Х. Куюмджиев и М. Васильев [175] составили программу для цифровой ЭВМ, которая выбирает наилучшую схему размещения каждого дождевального аппарата на поле при условии, что известны экспериментальные эпюры дождя.

Исследования равномерности полива аппаратами ОФ-5, «Бели-Лом» и «Esarinvio» при треугольной и прямоугольной схемах их расстановки провел А. Черпало [170].

В Японии разработана модель расчета эпюр дождя и коэффициента равномерности дождевания по Христиансену (J. Fukui) [173]. При расчете равномерности полива были учтены исходные данные: схема расстановки дождевальных аппаратов, полет капель дождя от насадки и эпюра дождя от экспериментального дождевального аппарата.

Наиболее точные расстояния между аппаратами и значения коэффициента равномерности полива получены на основе моделирования экспериментальных эпюр на ПК.

Программы расчета эпюр были разработаны в нашей стране [132] и за рубежом [184].

Для фронтальной машины «Днепр» В.М. Строгий [145] создал математическую модель расчета равномерности полива дождевальными аппаратами № 3 и №4 машины «Фрегат» и «Роса»-3:

$$h = [a + bP]e^{bHR - cHR}, \quad (1.7)$$

где H – напор струи на выходе, м;

R – радиус полива аппаратом, м;

a, b, c – коэффициенты уравнения.

Известно, что при поливе струйными аппаратами максимальный объем воды выпадает в конце радиуса захвата дождем [9]. Чтобы обеспечить высокую равномерность полива дальнеструйные и среднеструйные аппараты комплектуются дополнительными насадками меньшего диаметра для орошения ближней части поля.

В малорасходных аппаратах с одной насадкой для повышения равномерности полива чаще всего применяют специальные рассекатели, прерыватели или изменяют конструкцию насадки.

Исследованиями Т.Н. Нуриддинова [101] установлено, что на равномерность полива аппаратом «Роса-1» оказывают влияние геометрические параметры дефлектора коромыслового привода.

Разработанная конструкция привода позволила повысить надежность работы среднеструйных дождевальных аппаратов и эффективность полива. Модернизированные аппараты на ДМ «Волжанка» увеличили равномерность полива по сравнению с серийным дефлектором на 9 % [101].

Зарубежными исследователями проведены расчеты эпюр дождя для улучшения равномерности полива дождевальными широкозахватными машинами. Американским исследователем К. Solomon [84], разработана методика обработки опытных данных по распределению эпюр дождя и расчета требуемых параметров диаметра сопла и рабочего давления.

В исследованиях Н.Г. Hummel [174] представлены зависимости прямоугольного, эллиптического и треугольного распределения слоя дождя по длине радиуса

полива при прямолинейном и круговом перемещении трубопровода машины с аппаратами. Недостаток полученных уравнений в том, что их можно использовать только для принятых схем полива.

Эпюры распределения дождя при фронтальном движении трубопровода дождевальной машины ДДА-100МА определены и в статье Р. Райкова [182].

В ВолжНИИГиМе [132] разработана программа расчета эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива аппаратами ДМ «Фрегат» и «Волжанка». Однако точность расчетов дождевальных насадок небольшая, поэтому методику необходимо усовершенствовать.

Исходя из проведенного обзора установлено, что на форму эпюр распределения дождя от дождевальной насадки влияют следующие параметры: давление перед насадкой, ее диаметр, отношение давления к диаметру сопла, размеры дефлектора и др. Необходимо продолжить исследования по совершенствованию и уточнению параметров дождевальной насадки и устройств приповерхностного дождевания.

1.6 Выводы

1. Дождевальные машины «Фрегат» составляют основу парка поливной техники в Российской Федерации, в том числе и в Саратовской области. Дождь, формируемый серийными машинами, характеризуется высокой средней и мгновенной интенсивностью дождя, значительной крупностью капель. При увеличении высоты дождевого облака до 5...7 м. это вызывает значительные потери воды, уменьшает равномерность полива до 0,4...0,5, негативно сказывается на структуре почвы, разрушая и уплотняя ее верхний слой, а также приводит к преждевременному (до выдачи машиной поливной нормы) стоку воды.

2. Анализ многочисленных исследований, а также зарубежного опыта свидетельствует о перспективности и целесообразности использования устройств приповерхностного дождевания на дождевальных машинах. Это значительно снизит потери воды на испарение и унос ветром и повысит равномерность полива.

Обзор существующих конструкций устройств приповерхностного дождевания и анализ эффективности их применения позволил наметить пути их совершенствования: снижение металлоемкости, повышение надежности работы, уменьшение затрат на монтаж, демонтаж и регулировку по высоте над поверхностью почвы, повышение агротехнических параметров дождя.

3. Актуальным является проведение теоретических исследований по определению потерь воды при дождевании на испарение, унос ветром с учетом выдачи необходимой поливной нормы для дождевальных машин «Фрегат», а также по уточнению расчета диаметра регулирующего сопла, расхода воды, параметров распределения дождя по радиусу в зависимости от высоты установки насадки.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОСНОВАНИЕ УЛУЧШЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ПОЛИВА ДМ «ФРЕГАТ»

2.1 Обоснование применения приповерхностного полива ДМ «Фрегат»

Многочисленными исследованиями [23, 25, 49, 132, 152] установлено, что потери воды на испарение и унос ветром при поливе ДМ «Фрегат» достигают больших значений. Так, в дневные жаркие и ветреные дни они увеличиваются до 20–25 % и более по сравнению со средними величинами 10–15 %. Большие потери обусловлены значительной высотой подъема дождевого облака, которая изменяется от 4,1 м в начале машины (аппарат № 1) до 8 м в ее конце (аппарат № 4). В результате высокого давления на входе в машину «Фрегат», особенно при отсутствии или неправильной настройке аппаратов № 1, 2 и 3, создается мелкокапельный дождь и водяная пыль, которые легко уносятся ветром.

Для определения потерь воды на испарение и унос ветром были проанализированы результаты экспериментальных исследований многих авторов [25, 60, 78, 89, 93, 115, 132], которые проводили испытания различных типов дождевателей: дождевальных насадок, среднеструйных и дальнеструйных аппаратов, при поливе машинами: «Фрегат», «Волжанка», ДДА-100МА и установками АДП-350, КДУ и др. Результаты исследований в зависимости от конструктивно-технологических параметров дождевальных аппаратов, таких, как высота подъема дождевого облака; средний диаметр капель дождя; средняя и мгновенная интенсивность дождя; частота вращения аппарата, и метеорологических факторов – температуры и относительной влажности воздуха, скорости ветра, приведены в приложении А.

Согласно [152], температуру, относительную влажность воздуха и скорость ветра можно оценивать показателем напряженности

метеорологических факторов Φ , который предложено рассчитывать по формуле:

$$\Phi = t \left(1 - \frac{\varphi}{100} \right) (v_B + 1), \quad (2.1)$$

где t – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

φ – относительная влажность воздуха %;

v_B – скорость ветра, м/с.

Изменения потерь воды на испарение и унос ветром в зависимости от высоты подъема дождевого облака, среднего диаметра капель дождя и показателя напряженности метеорологических факторов Φ приведены на рисунках 2.1 и 2.2. График на рисунке 2.1 построен по результатам исследований, проведенных в Саратовской и Самарской областях [60, 132]. Из него видно, что потери воды на испарение и унос ветром увеличиваются с ростом высоты подъема дождевого облака и уменьшением крупности капель, а также с повышением напряженности метеорологических факторов Φ .

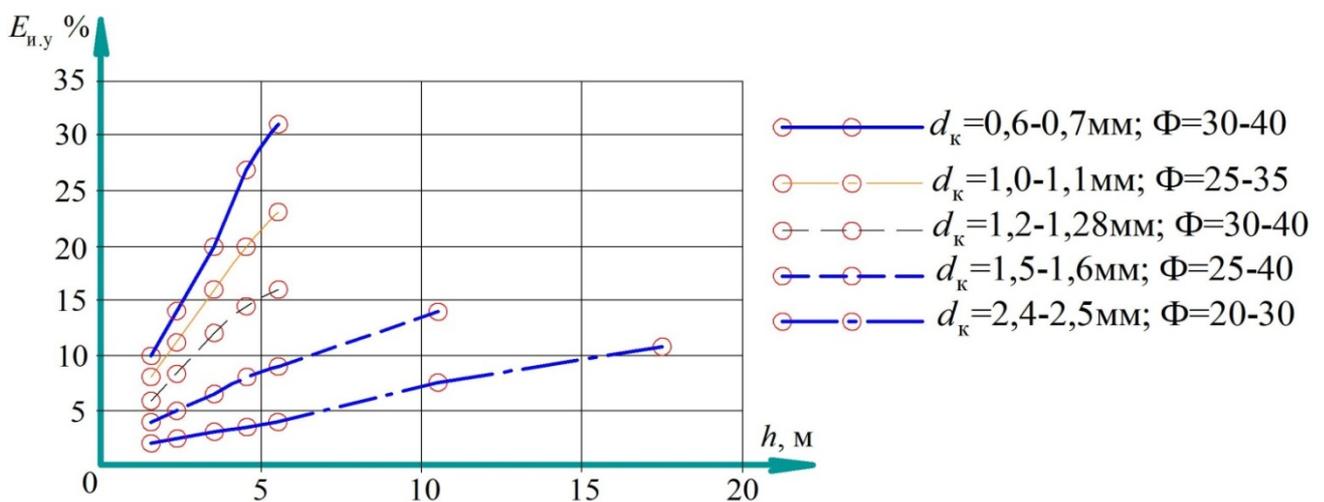


Рисунок 2.1 – Зависимость потерь воды на испарение и унос ветром от высоты подъема дождевого облака и напряженности метеорологических факторов Φ

На основе математической обработки экспериментальных данных (приложение А) с использованием формулы (2.1) нами уточнена формула [133] для расчета потерь воды на испарение и унос ветром в зависимости от конструктивно-

технологических параметров устройств приповерхностного дождевания и метеорологических факторов:

$$E_{и.у} = 1,22 \frac{h^{0,6} (n+1)^{0,08}}{d^{0,6} \rho_c^{0,2} \rho_m^{0,1}} \left[\left(1 - \frac{\varphi}{100}\right) (v_B + 1) \right]^{0,5} K_\alpha, \quad (2.2)$$

где h – высота подъема капель дождя над почвой, м;

n – частота вращения аппаратов, мин^{-1} ;

t – температура воздуха, $^{\circ}\text{C}$;

φ – относительная влажность воздуха, %;

v_B – скорость ветра, м/с;

K_α – коэффициент, учитывающий изменение величины испарения и уноса дождя в зависимости от угла α между трубопроводом машины и направлением ветра;

d – средний диаметр капель, мм;

ρ_c, ρ_m – средняя и мгновенная интенсивность дождя, мм/мин.

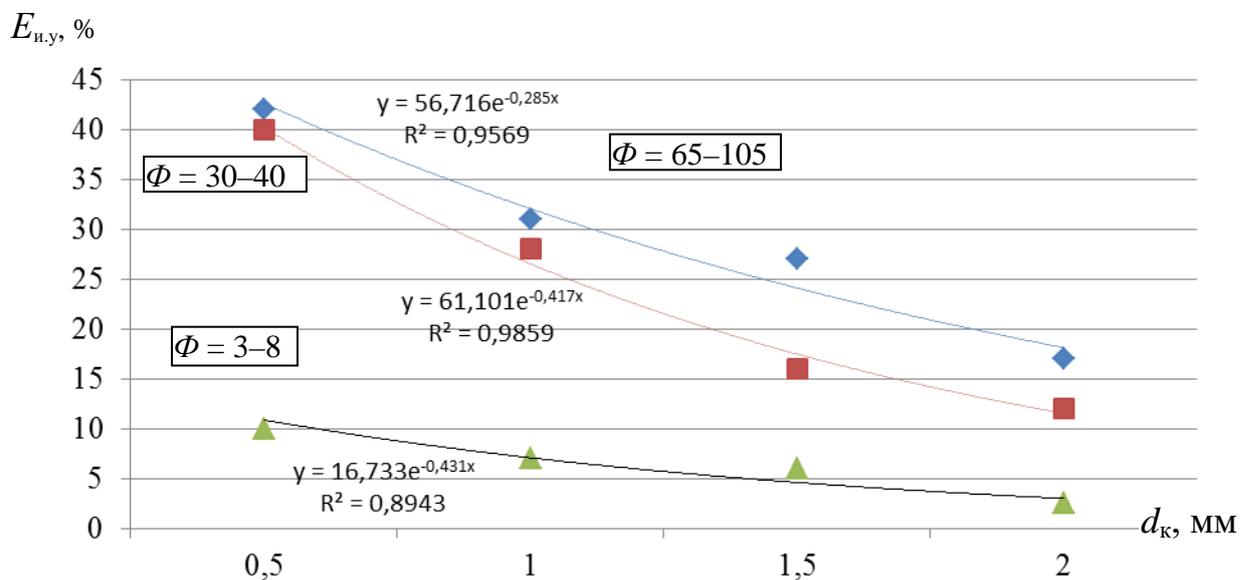


Рисунок 2.2 – Зависимость потерь воды на испарение и унос ветром от среднего диаметра капель и напряженности метеорологических факторов Φ

Для машин типа «Фрегат», «Волжанка», «Кубань» и др. коэффициент K_α рассчитывают по формуле:

$$K_{\alpha} = 1 - 0,009(90 - \alpha). \quad (2.3)$$

По формуле (2.2) можно производить расчет потерь воды на испарение и унос ветром как при поливе одиночным дождевателем (дождевальная насадка, среднеструйный или дальнеструйный аппарат), так и при поливе различными типами дождевальных машин, агрегатов или установок.

Анализ формулы (2.2) показывает, что основным направлением снижения потерь воды на испарение и унос ветром является уменьшение высоты подъема дождевого облака, что приводит к снижению ветровой нагрузки на струи и капли дождя.

По данным Н.П. Бредихина, С.Х. Гусейн-Заде, В.Ф. Дунского [9, 11, 37, 41], скорость ветра в зависимости от высоты замера от поверхности почвы изменяется по параболической кривой (рисунок 2.3) и описывается уравнением:

$$v_h = v_0(H/H_0)^{0,25}, \quad (2.4)$$

где v_h и v_0 – скорость ветра на высоте H и высоте замера H_0 .

Если на высоте $H = 2$ м от поверхности почвы скорость ветра составляет 3,7 м/с, то на высоте 7...8 м она увеличивается до 5,19...5,37 м/с, или на 36–41 %, и наоборот, при снижении высоты от поверхности почвы до 1...1,5 м скорость ветра уменьшается до 3,1...3,5 м/с, или на 7–19 %.

Таким образом, при осуществлении приповерхностного полива ДМ «Фрегат» скорость ветра можно снизить примерно в 1,46–1,68 раза и тем самым сократить потери воды на испарение и унос ветром.

Важное направление снижения потерь воды на испарение и унос ветром – оптимизация степени распыления струи. Известно, что при увеличении давления воды перед дождевателем крупность капель формируемого дождя уменьшается, а при очень большом давлении может создаваться водяная пыль с диаметром капель 0,05...0,2 мм, которая при оседании уносится ветром на значительное расстояние и практически испаряется [146]. В связи с этим необходимо оптимизировать степень распыления струи до значений 0,5...1,0 мм, что значительно сократит

потери воды на унос ветром и снизит воздействие дождя на почву и сельскохозяйственные культуры.

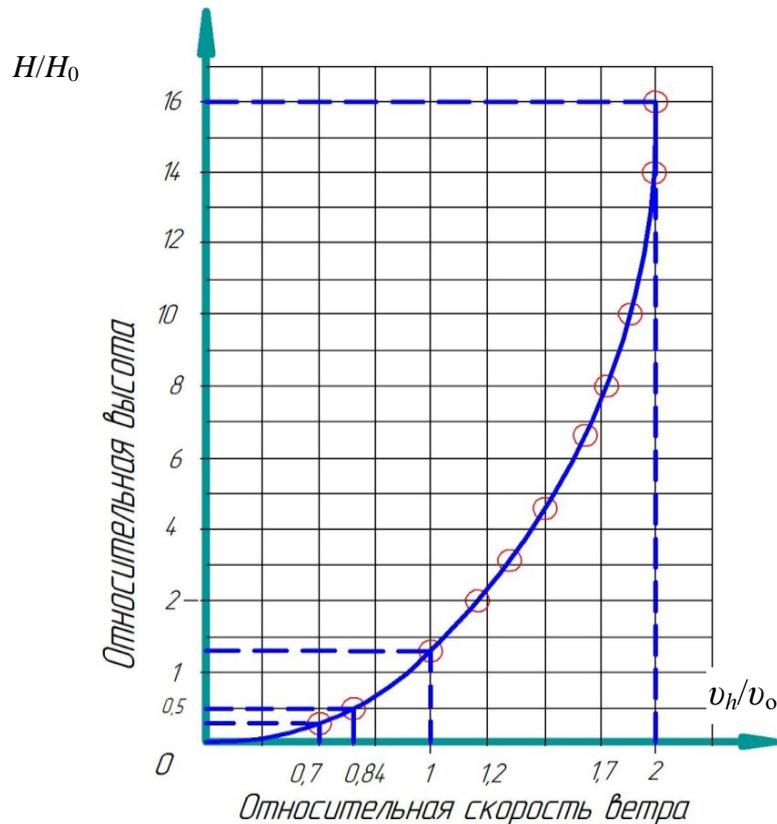


Рисунок 2.3 – Зависимость скорости ветра от высоты замера

Для оптимального распыления дождевальная насадка должна иметь определенный диаметр сопла и комплектоваться регулировочным переходником с калиброванным отверстием необходимого размера.

Также значительное влияние на величину потерь дождя на испарение и унос ветром оказывают метеорологические факторы (приложение А, рисунки 2.1 и 2.2). Если в дневные часы показатель напряженности метеорологических факторов Φ составляет 30–100 ед., то в ночные он обычно уменьшается примерно в 1,5–2 раза. Поэтому для снижения потерь воды выгодно проводить поливы в ночное время.

Дождевальные насадки с диаметром сопла 4...16 мм и диаметром дефлектора 50 мм, согласно исследованиям Б.М. Лебедева [75], имеют толщину пленки воды на сходе с дефлектора 0,10...1,28 мм. Угол расширения струи по высоте зависит от скорости потока и в среднем составляет 3–4 град. По мере удаления элементарно-

го участка потока от дефлектора концентрация водяной струи уменьшается. Чем больше толщина пленки и меньше ее скорость, тем больше длина полета концентрированного потока. При поливе дождевальной насадкой на струе можно выделить три участка ее полета (рисунок 2.4).

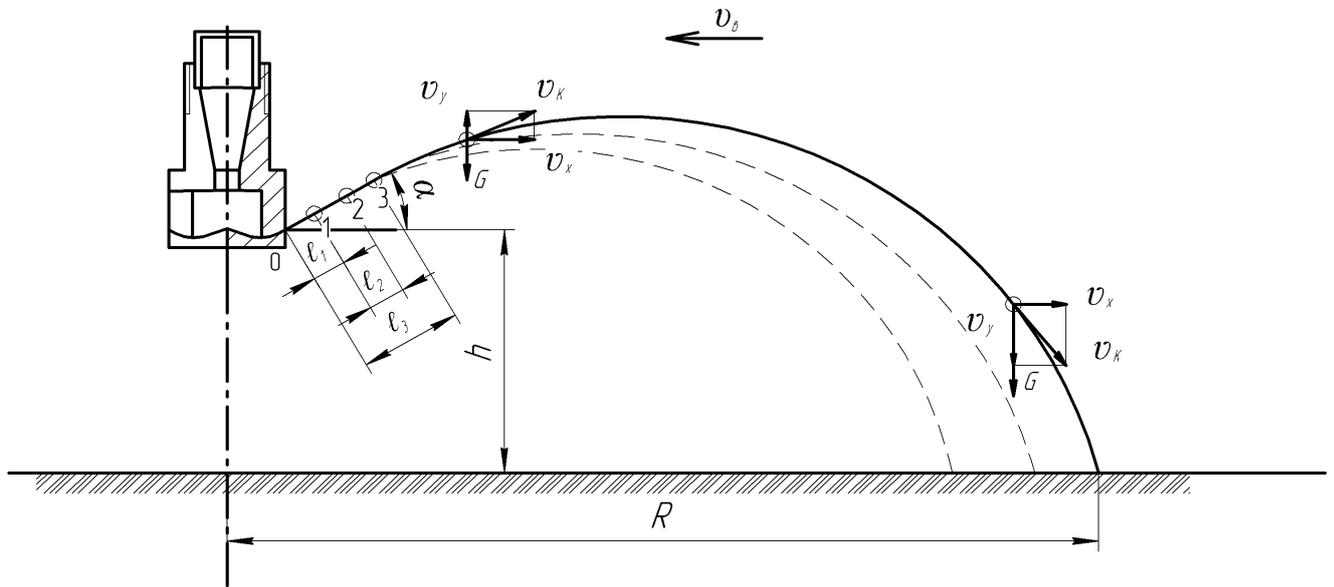


Рисунок 2.4 – Схема полета и распада водяной струи дождевальной насадки:
 v_y , v_x – вертикальная и горизонтальная скорости капель; v_k – скорость падения капель;
 G – вес капли; α – угол вылета струи, град.; R – радиус полета капли

На рисунке 2.4 участок 0–1 – сплошной поток воды l_1 (обычно 2...3 см); 1–2 – участок раздробленного потока l_2 ; 2–3 – участок распыления струи l_3 , где наблюдается полет отдельных капель дождя.

Падение капель с максимальной точки подъема дождевого облака происходит с увеличением скорости, а в дальнейшем с постоянной скоростью.

При постоянной скорости падения вес капли G равен силе сопротивления воздуха F_c [75]:

$$G = F_c \quad (2.5)$$

или

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \gamma = \pi r^2 \gamma_{\text{возд}} \frac{v_k}{q} C_x, \quad (2.6)$$

где r – радиус капли, мм;

γ – плотность воды;

$\gamma_{\text{возд}}$ – плотность воздуха;

v_k – скорость падения капли, м/с;

C_x – аэродинамический коэффициент капли;

g – ускорение свободного падения.

Подставляя в уравнение (2.6) значения плотности воды и воздуха, а также аэродинамического коэффициента капли, максимальную скорость падения капель (рисунок 2.5) можно определить по формуле Б.М. Лебедева [75]: $v_k = 4,11d_k^{0,5}$.

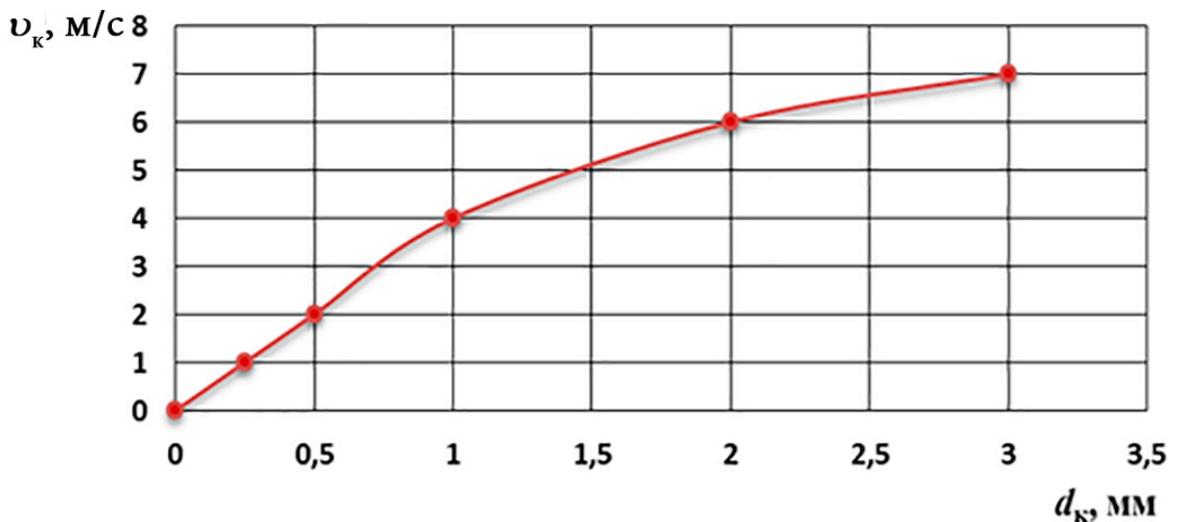


Рисунок 2.5 – Зависимость максимальной скорости падения капель дождя от их диаметра

Удельная мощность дождя, согласно исследованиям Г.А. Швевса [159], имеет вид:

$$N_y = 0,0083\rho \sum_{i=1}^n (n_i v_i)^2 = 0,14\rho d, \quad (2.7)$$

где N_y – удельная мощность, Вт/м²;

ρ – интенсивность дождя, мм;

n_i – доля капель i -го размера;

v_i – скорость падения капель i -го размера, м/с.

Расчеты показывают, что среднеструйные дождевальные аппараты формируют дождь большой мощности с крупными каплями и большой скоростью их падения

(таблица 2.1). Устройства приповерхностного полива с дождевальными насадками обеспечивают снижение высоты подъема капель дождя и среднего диаметра капель, что приводит к уменьшению скорости их падения и мощности дождя.

Таблица 2.1 – Зависимость скорости падения капель и удельной мощности дождя от типа дождевателя

Тип дождевателя	Диаметр сопла $D-d$, мм	Давление струи P , МПа	Средний диаметр капли d_k , мм	Высота подъема струи $h_{п}$, м	Скорость падения капли v_k , м/с	Удельная мощность дождя N_y , Вт/м ²
СДА	7,1–5,6	0,28	1,2	4,5	4,8	0,270
УПД - ДН	10,0	0,20	0,7	1,5	2,5	0,026

Таким образом, применение на ДМ «Фрегат» устройства приповерхностного дождевания с дождевальными насадками будет способствовать снижению потерь воды на испарение и унос ветром, а также уменьшению энергетического воздействия дождя на почву и сельскохозяйственные растения.

2.2 Обоснование конструкционных особенностей дождевальной насадки и устройств приповерхностного дождевания для ДМ «Фрегат»

При обосновании конструкции дождевальной насадки исходим из того, что она должна отвечать следующим условиям:

- обеспечивать расход воды 0,05...2,5 л/с (как серийные машины «Фрегат»);
- изменять режим потока струи применением регулировочного переходника, который позволит формировать дождевое облако с оптимальными параметрами распыления дождя;
- создавать ветровую устойчивость струи (угол ее вылета из насадки α должен быть 15–20 град.);
- обеспечивать слив воды из УПД после завершения каждого полива;

– минимизировать или не создавать реактивный момент при выходе струи из сопла.

Дождевальная насадка должна быть простой по конструкции и в изготовлении, иметь невысокую стоимость (не используются цветные металлы).

С учетом данных положений разработана дождевальная насадка с дефлектором «обратный конус» состоящая из полимерного материала (рисунок 2.6, *a*), которая состоит из корпуса 1 с коническим дефлектором 2, выполненным в виде обратного конуса (патент № 170892). Дефлектор 2 установлен на двух ножках 3. Для настройки дождевальной насадки на требуемый расход воды и качественное распыление дождя в корпус 1 под натягом вставляют переходник 4 с калиброванным отверстием 5. Диаметр сопла D изменяется от 2,2 до 12 мм, средний его диаметр D_c составляет 7 мм. Диаметр калиброванного отверстия переходника $d_{\text{п}}$ изменяется от 2,5 до 11,0 мм. В нижней части корпуса насадки выполнена коническая резьба (3/4 дюйма), которая позволяет монтировать насадку в муфту устройства приповерхностного дождевания.

Исследованиями дефлекторных насадок, проведенными Б.М. Лебедевым [75], А.П. Исаевым [51] и др., установлено, что на сходе с дефлектора насадки (рисунок 2.6, *a*) тонкая пленка зависит от его геометрических размеров, но на нее не влияет скорость воды. Ширина пленки определяется диаметром основания конуса. Для создания хорошего распыления струи диаметр дефлектора должен составлять:

$$D_{\text{д}} = 5,0D_{\text{с}}, \quad (2.8)$$

где $D_{\text{с}}$ – средний диаметр сопла дождевальной насадки, мм.

Высота края дефлектора $h_{\text{д}}$ должна быть больше высоты конуса $h_{\text{к}}$ на 10–15 %, ($h_{\text{д}} > h_{\text{к}} = 8 > 6$ мм). Это делается для того, чтобы водяная струя имела устойчивое направленное движение под углом 15...20 град. к горизонту.

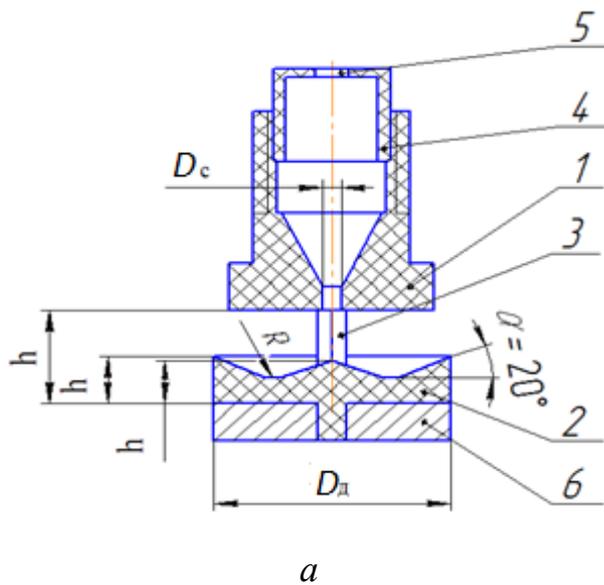


Рисунок 2.6 – Схема и фото дождевальной насадки с дефлектором «обратный конус» (а, б): 1 – корпус; 2 – конический дефлектор; 3 – ножка; 4 – переходник; 5 – калиброванное отверстие; 6 – груз

Струя дождя после схода с дефлектора насадки распадается на капли небольшого размера, которые снижают воздействие на почву и растения. Чтобы уменьшить засорение ножек насадки мусором, их высота не может быть меньше диаметра дефлектора:

$$h = D_{\text{д}}, \quad (2.9)$$

где $D_{\text{д}}$ – диаметр дефлектора.

Из условия необходимой прочности и жесткости крепления дефлектора ширина ножек должна находиться в пределах:

$$B_{\text{н}} = (1,1-1,4)D_{\text{с}}, \quad (2.10)$$

толщина ножек –

$$T_{\text{н}} = (0,4-0,5)D_{\text{с}}, \quad (2.11)$$

где $D_{\text{с}}$ – диаметр сопла.

Конструктивные параметры ножек дождевальной насадки определяли из условия достаточной напряженности на разрыв σ :

$$\sigma = \frac{P}{2S_H} \leq [\sigma_P] = \frac{\sigma_B}{n}, \quad (2.12)$$

где σ – напряжение, возникающее в материале под действием нагрузки, кг/см²;

P – максимальная сила воздействия вылетающей струи на конус дефлектора, кг;

σ_P – допустимое напряжение при растяжении, кг/см²;

σ_B – предел прочности при растяжении (для полиамида ПА-6 $\sigma_B = 600$ кг/см²);

S_H – площадь поперечного сечения ножки, см²;

n – коэффициент запаса прочности (принимается $n = 1,5$).

Сила воздействия струи на дефлектор насадки:

$$P = \rho q v (1 - \sin\theta), \quad (2.13)$$

где ρ – плотность воды, кг/дм³;

q – максимальный расход воды из дождевальной насадки, л/с;

v – скорость струи, м/с;

θ – угол между направлением струи и плоскостью конуса (для дождевальной насадки угол $\theta = 23$ град.).

Максимально возможное давление в конце трубопровода машины «Фрегат» в момент пуска и возможного гидроудара составит 0,55 МПа, а максимальный расход воды дождевальной насадкой с соплом диаметром 12 мм – 2,5 л/с при скорости струи на выходе из сопла:

$$v = \varphi (2_g P)^{0,5} = 0,85(2 \cdot 9,8 \cdot 55)^{0,5} = 28 \text{ м/с}. \quad (2.14)$$

Отсюда максимальная сила воздействия струи на дефлектор насадки:

$$P = 1 \cdot 3,5 \cdot 28(1 - 0,39) = 59,78 \text{ кг}. \quad (2.15)$$

В поперечном сечении ножка дождевальной насадки имеет вид линзы или эллипса, которые хорошо обтекаются водяной струей. Площадь поперечного сечения эллипса определяется по формуле:

$$S_n = 0,75B_nT_n, \quad (2.16)$$

где B_n – ширина ножки, см;

T_n – толщина ножки дождевальной насадки, см.

Отношение толщины к ширине ножки равно $T_n = 0,3B_n$.

Тогда площадь сечения составит:

$$S_n = 0,15B_n^2. \quad (2.17)$$

Подставив уравнение (2.17) в формулу (2.12), получим ширину ножки дождевальной насадки:

$$B_n = (P/0,3\sigma_p)^{0,5} = [\rho q v(1-\sin\theta)/0,3\sigma_p]^{0,5}. \quad (2.18)$$

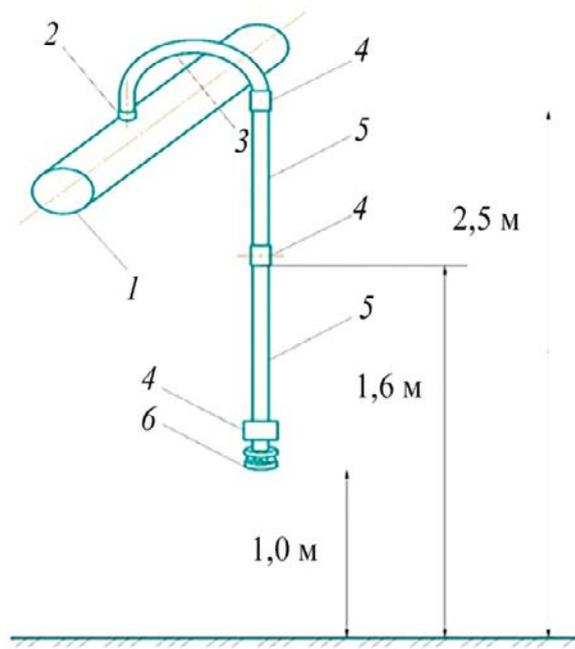
Разработка таких насадок позволила усовершенствовать устройства приповерхностного дождевания.

Устройства приповерхностного дождевания типа «сборный рукав», «сборная штанга», «поворотная штанга» представлены на рисунках 2.7, б, з, 2.8, а. Их можно изготавливать из более дешевых и доступных материалов, не подверженных коррозии, например таких, как напорный рукав, полихлорвиниловые, полиэтиленовые или полипропиленовые трубы и др. (патент № 169912). УПД монтируют возле трубопровода машины или с установкой вперед или назад относительно трубопровода на горизонтальных тросах (рисунок 2.8, в).

Данные устройства обеспечивают слив воды после прекращения полива, не трудоемки в изготовлении и просты в регулировке.

Для обеспечения вертикального положения дождевальной насадки на УПД типа «сборный рукав» комплектуют грузом и настраивают на оптимальный напор на выходе струи (рисунок 2.9). Рабочее давление в зависимости от диаметра сопла

и расхода воды при вертикальном положении дождевальной насадки показано на рисунке 2.10.



а

б



в

г

Рисунок 2.7 – Схема и фото устройств приповерхностного дождевания типа: «сборный рукав» (*а, б, в*): *1* – трубопровод машины; *2* – штуцер; *3* – переходник; *4* – муфта; *5* – труба, рукав; *б* – дождевальная насадка; сборная штанга (*г*)

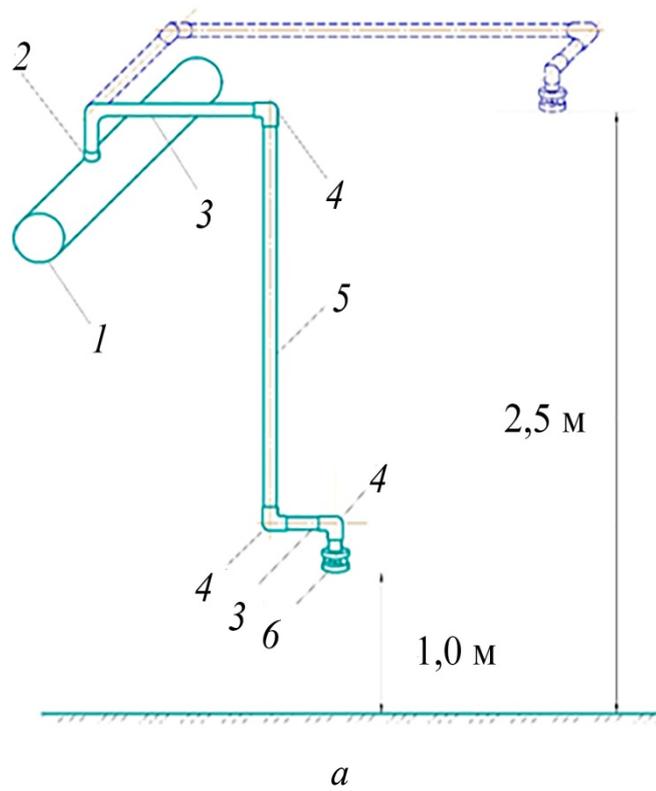
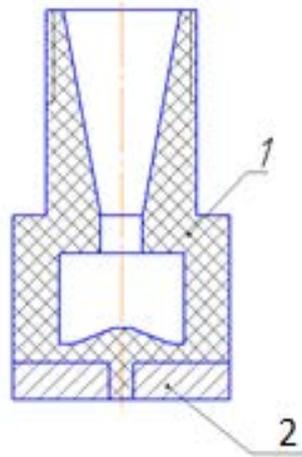
*б**в*

Рисунок 2.8 – Схема (а) и фото (б, в) устройства приповерхностного дождевания типа «поворотная штанга»:
 1 – трубопровод машины; 2 – штуцер; 3 – переходник; 4 – угольник;
 5 – труба; 6 – дождевальная насадка



а

б

Рисунок 2.9 – Схема дождевальной насадки с дефлектором «обратный конус» и грузом: 1 – корпус насадки; 2 – груз

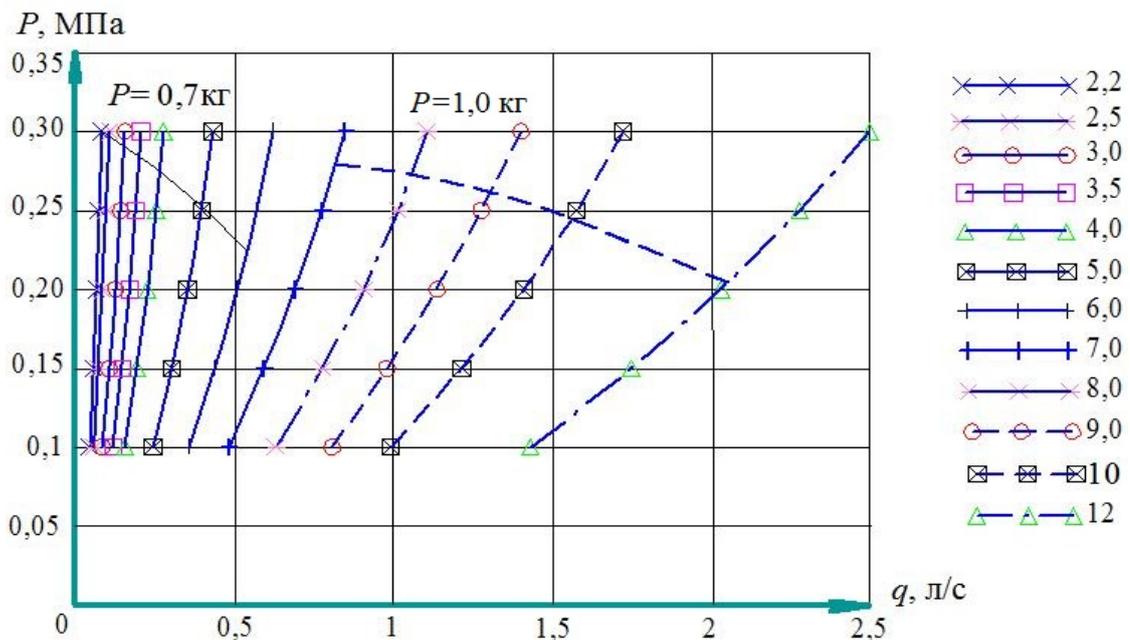


Рисунок 2.10 – Зависимость рабочего давления и массы груза для обеспечения вертикального положения дождевальной насадки от диаметра сопла

Исследования показали, что для насадки, имеющей диаметр сопла 2,2...6,0 мм и расход воды 0,1...0,6 л/с, груз должен быть массой 0,7 кг, диаметр сопла 7...10 мм и расход воды 0,7...2,2 л/с – 1 кг. Рабочее давление 0,28...0,21 МПа следует настраивать регулировочным переходником.

2.3 Анализ методики расчета эпюр распределения дождя дождевальной насадкой

Равномерность полива дождевальной машиной как один из основных агротехнических показателей оказывает значительное влияние на равномерность увлажнения почвы, урожайность и качество сельскохозяйственных культур [8, 62, 63, 75, 130].

Многочисленными исследованиями [53, 75, 112, 132] установлено, что на равномерность полива дождевальными машинами кругового действия влияет скорость ветра и его направление относительно трубопровода машины, а также конструктивно-технологические параметры дождевателей, наиболее важные из которых – радиус полива и расстояние между дождевателями. При этом, чем больше степень перекрытия струй, тем выше равномерность полива [53, 75, 132]. Значительное влияние на равномерность полива машинами оказывает равномерное распределение дождя отдельными дождевателями вдоль радиуса полива.

Равномерность полива вдоль радиуса захвата дождевальной насадкой определяет форма эпюры распределения дождя, которая показывает, какой объем воды попадает в определенную точку радиуса полива (рисунок 2.11). Эпюра распределения дождя используется также для оценки среднего и медианного диаметра капель, скорости их падения, кинетического и силового воздействия дождя на почву.

Для того чтобы правильно решать вопросы конструирования дождевальных машин и выбора их технических параметров в зависимости от характеристик конкретного орошаемого участка, необходимо проводить расчеты эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива в зависимости от конструктивно-технологических параметров дождевальной насадки.

В ВолжНИИГиМ [132] были разработаны программы расчета эпюр распределения дождя и коэффициента равномерности полива для среднеструйных дождевальных аппаратов типа «Фрегат», а также для машин кругового и фрон-

тального действия типа «Фрегат» и «Волжанка». Для расчета было предложено использовать β -распределение дождя вдоль радиуса полива [155]. Характеристики и формы эпюр распределения дождя зависят от коэффициентов γ и η (рисунок 2.11).

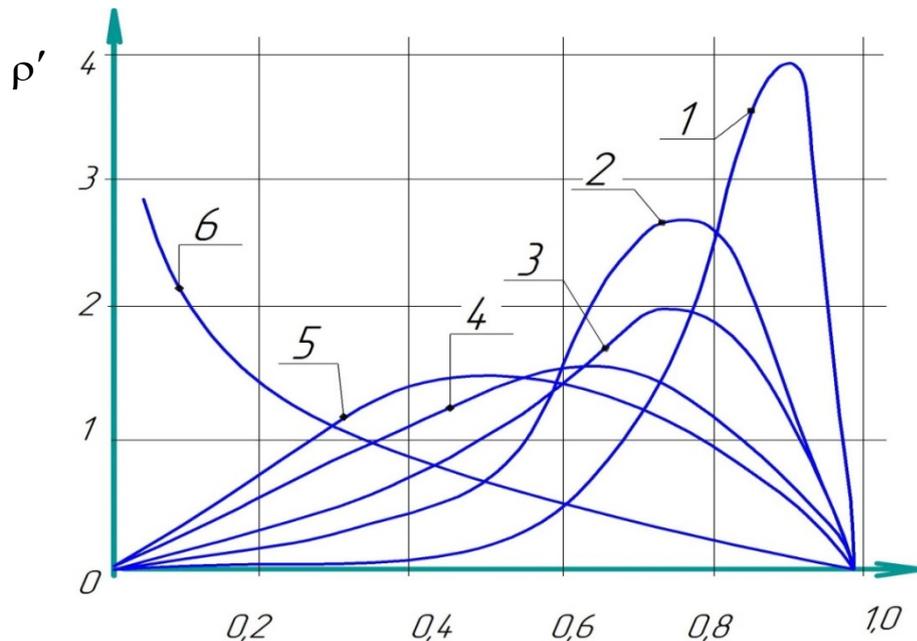


Рисунок 2.11 – Зависимость форм эпюр β -распределения дождя вдоль относительного радиуса R_i/R от коэффициентов γ и η при нормальной интенсивности дождя:

- 1 – $\gamma = 6,3$; $\eta = 1,17$; 2 – $\gamma = 5,0$; $\eta = 1,31$; 3 – $\gamma = 3,6$; $\eta = 1,45$;
4 – $\gamma = 2,04$; $\eta = 1,72$; 5 – $\gamma = 2,07$; $\eta = 2,07$; 6 – $\gamma = 0,75$; $\eta = 1,98$

Исследованиями дождевальных насадок определен характер изменения эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива (рисунок 2.12). Для математического описания эпюр также использовано β -распределение дождя, параметры которого зависят от диаметра сопла дождевальной насадки и давления на выходе струи из сопла. Анализ эпюр распределения дождя показывает, что при невысоком давлении ($P = 0,05 \dots 0,10$ МПа) и при $P/D = 0,01 \dots 0,02$ МПа/мм основная часть дождя выпадает в конце радиуса полива (рисунок 2.12), по мере увеличения давления эпюра распределения дождя становится более равномерной. При высоком давлении ($P > 0,3$ МПа) и отношении $P/D = 0,03 \dots 0,05$ МПа/мм основной объем воды выпадает уже в начале радиуса полива.

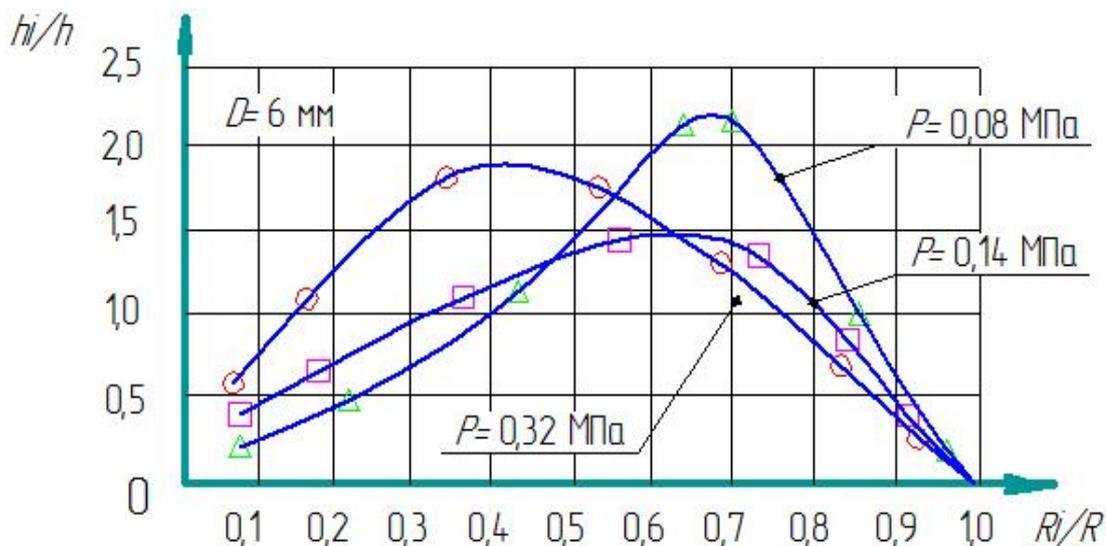


Рисунок 2.12 – Зависимость форм эюр β -распределения нормированного слоя дождя от относительного радиуса полета струи

Ранее [132] для расчета эюр распределения дождя дождевальными насадками использовали только одно распределение, которое дает точный расчет большей части водяной струи в середине и конце радиуса полива, но не позволяет вычислить всю эюру. β -распределение дождя имеет нулевые значения как в начале, так и в конце радиуса полива [155]. Отклонение расчетной интенсивности дождя от фактической в начале радиуса полива значительное, так как при увеличении отношения P/D , особенно для насадок с соплом небольшого диаметра, образуется много мелких капель, которые выпадают в районе установки дождевальной насадки.

Для более точного определения эюры распределения дождя дождевальной насадкой $\rho'_{i_{\text{дн}}}$ предлагается рассчитывать ее как суммарную (рисунок 2.13, а). Состоящую из эюры распределения дождя от основной части струи $\rho'_{i_{\text{осн}}}$ (рисунок 2.13, б), имеющей нулевые значения в конце и начале радиуса полива, и дополнительной ее части $\rho'_{i_{\text{доп}}}$ (рисунок 2.13, в), имеющей максимальные значения в начале радиуса полива:

$$\rho'_{i_{\text{дн}}} = \rho'_{i_{\text{осн}}} + \rho'_{i_{\text{доп}}}. \quad (2.19)$$

Для более точного математического расчета интенсивности дождя, определяем ее как нормированную:

$$\rho' = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{ср}}}, \quad (2.20)$$

где ρ_i - i значений интенсивности дождя;

$\rho_{\text{ср}}$ - средние значения интенсивности дождя.

Для нормированных данных интенсивности дождя $\rho'_{i\text{дн}}$ сумма i значений равна: $\frac{\sum \rho_i}{n} = 1$, (2.21)

где n – число точек расчета, величин интенсивности дождя.

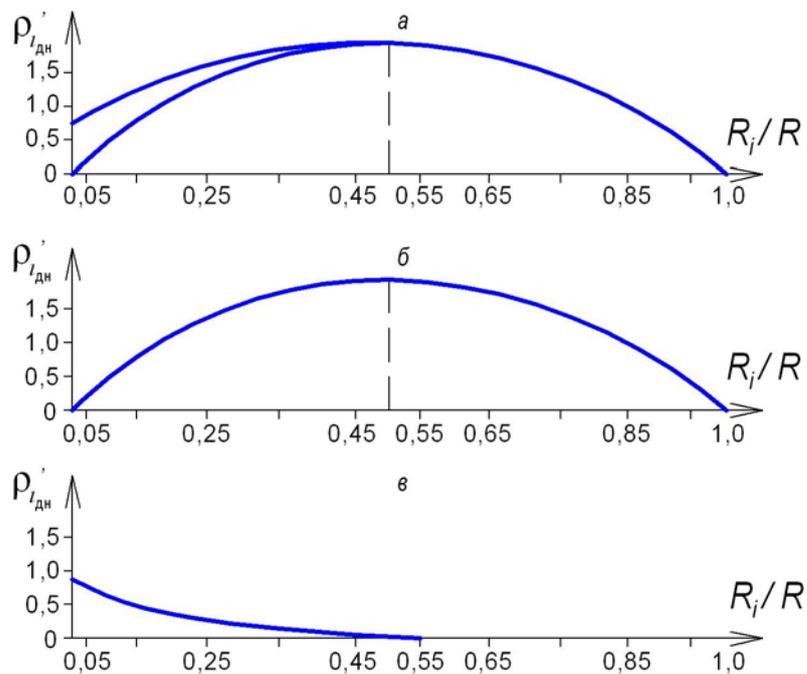


Рисунок 2.13 – Схема для расчета распределения интенсивности дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой: a – суммарная эпюра; b – основная эпюра; v – дополнительная эпюра; i – точка вдоль радиуса полива

Исследование эпюр распределения дождя вдоль дождевальной насадки показывает, что при изменении диаметра сопла от 6 до 16 мм и P/D от 0,01 до

0,054 МПа/мм, нормированная интенсивность дождя в нулевой точке начала радиуса полива $\rho'_{0\text{доп}}$ изменяется от 0,2 до 0,8 (таблица 2.2, рисунок 2.14).

Таблица 2.2 – Зависимость интенсивности дождя в нулевой точке начала радиуса полива $\rho'_{0\text{доп}}$ дождевальной насадкой от диаметра сопла D и давления P .

Диаметр сопла D , мм	Давление струи P , МПа	Нормированная интенсивность дождя $\rho'_{0\text{доп}}$	Диаметр сопла D , мм	Давление струи P , МПа	Нормированная интенсивность дождя $\rho'_{0\text{доп}}$
6	0,08	0,45	8	0,075	0,40
	0,14	0,60		0,190	0,60
	0,32	0,80		0,285	0,70
10	0,06	0,30	12	0,130	0,25
	0,12	0,35		0,280	0,35
	0,18	0,45		0,580	0,45
14	0,15	0,22	16	0,160	0,20
	0,30	0,30		0,250	0,25

Нормированную интенсивность дождя в нулевой точке начала радиуса полива рассчитывали по формуле:

$$\rho'_{0\text{доп}} = 1,545 \frac{P^{0,4}}{D^{1,1}}, \quad (2.22)$$

в i -й точке радиуса полива – по зависимости

$$\rho'_{i\text{доп}} = \rho'_{0\text{доп}} - (\rho'_{0\text{доп}} / 0,55)(R_i/R). \quad (2.23)$$

Зная $\rho'_{0\text{доп}}$, можно определить объем воды от дополнительной части струи, который изменяется от 0 до $0,55R$:

$$K_{\text{доп}} = (\sum \rho'_{i\text{доп}} / n), \quad (2.24)$$

где n – число точек расчета

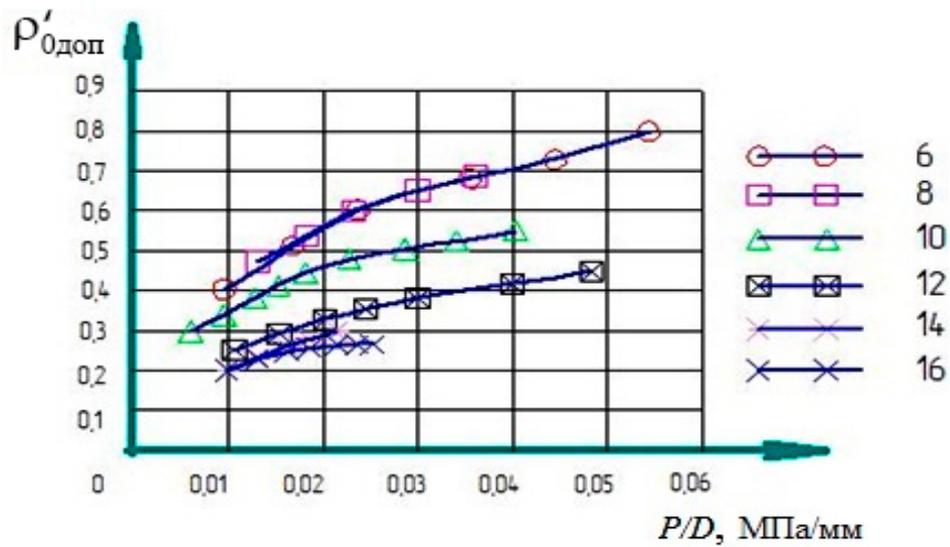


Рисунок 2.14 – Зависимость нормированной интенсивности дождя в нулевой точке начала радиуса полива $\rho'_{доп}$ дождевальной насадкой от диаметра сопла D и давления P

Для эюр распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой $K_{доп}$ изменяется от 0,22 до 0,55 и рассчитывается по формуле:

$$K_{доп} = \rho'_{доп} \frac{0,55}{2} = 0,275\rho'_{доп}. \quad (2.25)$$

Объем воды от основной части струи равен: $K_{осн} = 1 - K_{доп}$.

Зная фактические значения интенсивности дождя $\rho'_{дн}$ и дополнительной части струи $\rho'_{доп}$, определили нормированную интенсивность дождя основной ее части $\rho'_{осн}$. По величине $\rho'_{осн}$ вычислили ее расчетное значение $\rho'_{осн,р}$:

$$\rho'_{осн,р} = \rho'_{осн} (1/K_{осн}). \quad (2.26)$$

По расчетному значению интенсивности дождя $\rho'_{осн,р}$ определяли коэффициенты γ и η в зависимости от диаметра сопла и давления. Используя данную методику, рассчитали эюры распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Фактические и расчетные значения нормированной интенсивности дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой (диаметр сопла 6 мм, давление 0,32 МПа)

Нормированная интенсивность дождя	Относительный радиус полива дождевальной насадкой R_i/R											
	0	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95	1,0
Фактическая вдоль радиуса полива, мм/мин.	0,8	0,9	1,05	1,54	1,81	1,76	1,6	1,36	1,1	0,6	0,1	0
Расчетная от основной части струи ($\gamma = 2,35$; $\eta = 2,45$), мм/мин;	0	0,187	0,703	1,169	1,496	1,648	1,616	1,406	1,047	0,59	0,14	0
от дополнительной части струи, мм/мин.	0,8	0,73	0,58	0,43	0,3	0,14	0	–	–	–	–	–
Суммарная вдоль радиуса по- лива дождевальной насадкой, (сумма отклонений 0,516), мм/мин	0,8	0,917	1,283	1,599	1,796	1,788	1,616	1,406	1,047	0,59	0,14	0
по известной методике [132] ($\gamma = 2,02$; $\eta = 2,37$; сумма от- клонений 2,64) мм/мин	0	0,357	0,94	1,33	1,545	1,588	1,48	1,244	0,908	0,512	0,127	0

Расчеты показывают, что суммарная эпюра, состоящая из эпюр распределения дождя от основной и дополнительной частей струи, имеет незначительную сумму отклонений фактических значений от расчетных – 0,516 (вариант 1). При расчете по известной методике [132] сумма отклонений в 5 раз больше и составляет 2,64 (вариант 2).

Учитывая данные положения, разработана методика расчета эпюр распределения дождя и коэффициента равномерности полива дождевателями и дождевальными машинами на ПК. Эти расчеты были учтены при разработке карт настройки дождевальных насадок, устанавливаемых по определенной схеме на трубопроводе ДМ «Фрегат», что обеспечило хорошую равномерность полива.

2.4 Выводы

1. Теоретически обосновано уменьшение суммарных потерь воды на испарение и унос ветром при поливе дождевальными насадками и ДМ «Фрегат». Уточнена формула (2.1) для определения величин потерь воды на испарение и унос в зависимости от технологических параметров (высота подъема дождевого облака, крупности капель дождя, средняя и мгновенная интенсивность дождя и др.) и метеорологических факторов (температура и относительная влажность воздуха, скорость ветра и его направление относительно трубопровода машины) климата.

Установлено, что для снижения энергетического воздействия дождя на почву полив следует осуществлять устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками, которые создают мелкокапельный дождь, обеспечивают снижение скорости падения капель и мощность дождя.

2. На основе теоретических исследований разработана новая дождевальная насадка с дефлектором «обратный конус» (патент № 170892), которая обеспечивает слив воды из устройства приповерхностного дождевания и минимизирует реактивный момент при выходе струи из сопла. Применение таких дождевальных насадок упрощает конструкцию УПД и повышает надежность их работы. Разработаны устройства приповерхностного дождевания типа «сборная

штанга», «сборный рукав» которые изготавливаются из доступных материалов, не подверженных коррозии, таких, как напорный рукав, полихлорвиниловая, пластмассовая или полимерная трубы (патент № 169912).

Устройство типа «поворотная штанга» менее трудоемко в изготовлении и просто в регулировке. Высота его установки над поверхностью почвы изменяется от 1,0 до 2,5 м. Устройства приповерхностного дождевания устанавливаются вперед и назад относительно трубопровода машины для увеличения площади полива.

3. Усовершенствована методика расчета суммарной эпюры распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой, состоящей из эпюр распределения дождя от основной и дополнительной части водяной струи.

Получена формула для расчета значений нормированной интенсивности дождя в месте установки дождевальной насадки в зависимости от диаметра сопла и рабочего напора. Разработанная методика расчета эпюр распределения дождя на ПК, позволяет выбирать оптимальные режимы работы дождевальных насадок для обеспечения высокой равномерности полива на площади захвата дождем.

3 ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПОЛЕВЫХ ИСПЫТАНИЙ

3.1 Программа оценки работы модернизированных ДМ «Фрегат»

Для подтверждения достоверности полученных результатов и соответствия их теоретическим расчетам была составлена программа лабораторно-полевых экспериментальных исследований разработанных дождевальных насадок и устройств приповерхностного дождевания для ДМ «Фрегат».

Программа исследований состояла из трех этапов.

На первом этапе проводили лабораторные исследования дождевальных насадок и устройств приповерхностного дождевания. Изучали их расходные характеристики, гидравлические потери по длине УПД, дальность полета струи и высоту ее подъема в зависимости от давления, диаметра сопла и высоты монтажа насадки над уровнем земли, а также характеристики интенсивности дождя вдоль трубопровода ДМ «Фрегат», крупность капель, формы эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой.

На втором этапе исследовали технические характеристики и эксплуатационные показатели дождевальной машины, как при высоком, так и при низком давлении. Изучали расход воды дождевальной машиной в зависимости от давления на входе в нее, вероятность отказа дождевальных насадок и их засорения. По результатам исследований составили карты настройки ДМ «Фрегат» различных модификаций.

На третьем этапе проводили испытания ДМ «Фрегат» с серийными и новыми дождевальными насадками, смонтированными на устройствах приповерхностного дождевания. Исследовали такие агротехнические показатели, как равномерность распределения дождя на орошаемом участке, изменение влажности почвы при поливе, потери воды на испарение и унос ветром в зависимости от метеорологических факторов и конструктивно-технологических параметров дождевальных насадок.

Оценивали урожайность сельскохозяйственных культур при поливе различными типами дождевателей. Определяли экономическую эффективность внедрения дождевальных насадок и устройств приповерхностного дождевания на ДМ «Фрегат».

3.2 Методика исследования агротехнических показателей полива дождевальными насадками

Исследования агротехнических показателей полива серийными и новыми дождевальными насадками проводили в соответствии с положениями СТО АИСТ 11.1–2010 [142].

Опыты выполняли в Саратовском аграрном университете им. Н.И. Вавилова, гидротехнической лаборатории ВолжНИИГиМ и в полевых условиях на различных оросительных системах. Скорость ветра при испытаниях была близкой к нулю.

Для проведения исследований в СГАУ им. Н.И. Вавилова был изготовлен стенд (рисунок 3.1), обеспечивающий подачу воды по напорному трубопроводу 1 от насоса 2 через расходомер к дождевальной насадке 3, которую устанавливали на стояке 4 со штангой 5. Давление в штанге 5 устанавливали регулировочным краном 9 и измеряли образцовым манометром 6 (ГОСТ 2405–88). Мерные емкости 8 размещали по лучам радиусов полива с интервалом 0,5 м и углом 10–15 град.

Расходные характеристики дождевальных насадок, имеющих различные диаметры, определяли с использованием мерного бака (рисунок 3.2). Необходимое полное давление на выходе струи из сопла насадки, устанавливаемое регулировочным краном 9, измеряли путем ввода трубки Пито в струю на расстоянии 3–5 мм от насадки (рисунок 3.3). На дождевальную насадку устанавливали заборный колпак со шлангом. Вода по шлангу подавалась от насадки в мерный бак объемом 40 л. Время заполнения мерного бака измеряли секундомером (ГОСТ 1197–70). Расход воды дождевальной насадкой рассчитывали по формуле [142]:

$$q = \frac{V}{t}, \quad (3.1)$$

где V – объем воды в мерном баке, л;

t – время заполнения мерного бака, с.

Для определения максимальной дальности полета струи дождевальную насадку (рисунок 3.1) устанавливали на стояке на различную высоту от земли

(1,0...2,5 м). Максимальную дальность полета струи измеряли от оси установки дождевальной насадки над поверхностью земли до точки падения последних капель дождя. Размер сопла дождевальной насадки изменяли от 2,2 до 12 мм, давление на выходе струи – от 0,1 до 0,3 МПа.

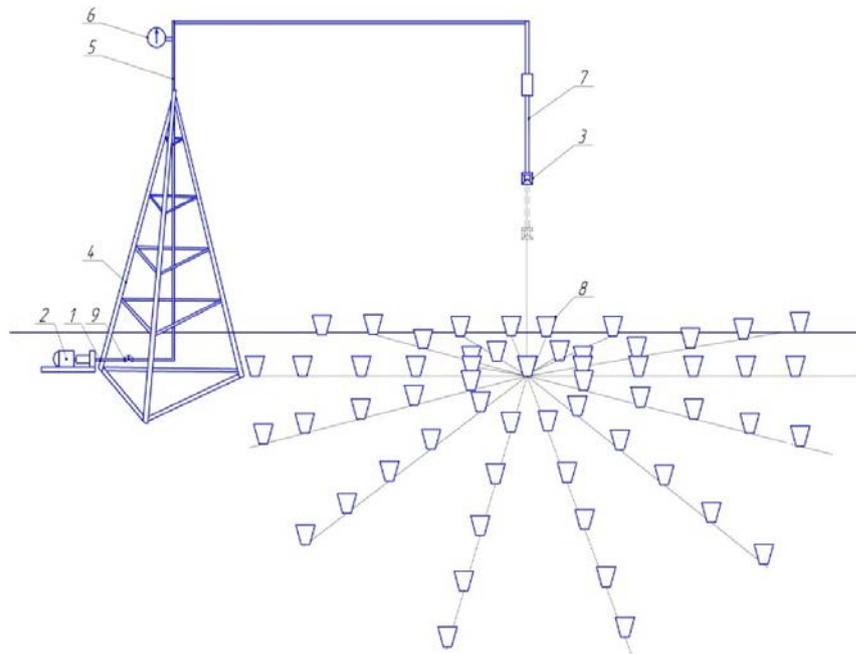


Рисунок 3.1 – Оборудование для исследований дождевальных насадок и устройств приповерхностного дождевания: 1 – напорный трубопровод; 2 – центробежный насос; 3 – дождевальная насадка; 4 – стояк; 5 – штанга; 6 – образцовый манометр; 7 – устройство приповерхностного дождевания; 8 – мерные емкости; 9 – регулировочный кран



Рисунок 3.2 – Определение расходных характеристик дождевальных насадок с помощью мерного бака

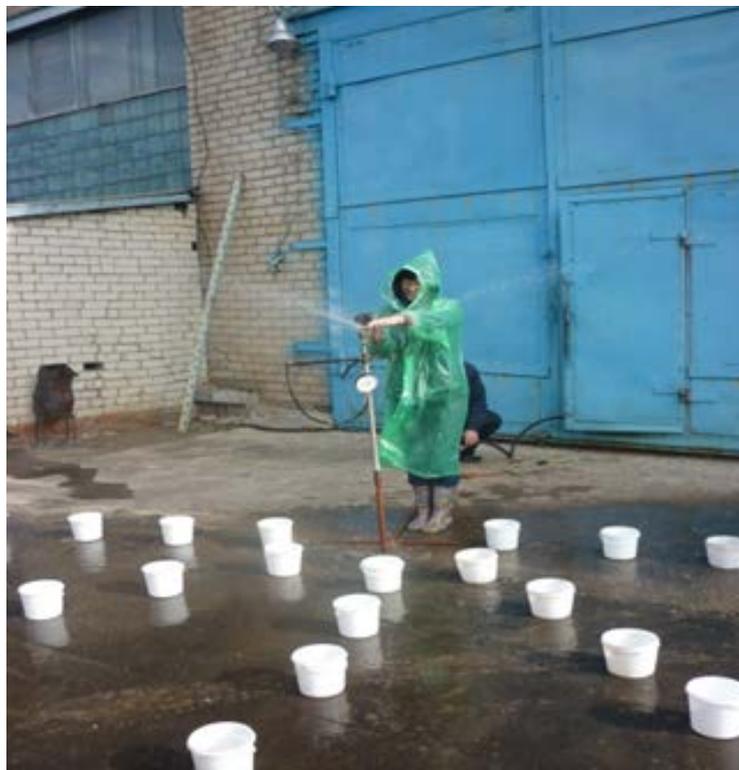


Рисунок 3.3 – Измерение напора струи на выходе из дождевальной насадки с использованием трубки Пито

Время оборота дождевального аппарата определяли секундомером (ГОСТ.1197–70), а частоту вращения – по формуле:

$$n = \frac{60}{t_0}, \quad (3.2)$$

где t_0 – время вращения аппарата вокруг своей оси, с.

Среднюю мгновенную интенсивность дождя ρ_c рассчитывали делением расхода воды q на площадь полива среднеструйным аппаратом Π_c или дождевальной насадкой Π_n :

$$\rho_c = \frac{60q}{\Pi_c} = \frac{60q}{0,785RB}, \quad (3.3)$$

$$\rho_c = \frac{60q}{\Pi_n} = \frac{60q}{\pi R^2}, \quad (3.4)$$

где q – расход воды, л/с;

R – радиус полива среднеструйным аппаратом или дождевальной насадкой;

B – максимальная ширина захвата струей, м.

Максимальную ширину захвата струей B устанавливали на основании замеров площади мгновенного полива.

Крупность капель дождя определяли с помощью обеззоленных бумажных фильтров. Их натирали чернильным порошком и закладывали в прибор, который помещали в зону замера. Прибор открывался на короткое время, при котором на бумажном фильтре образовывалось несколько отпечатков падающих капель дождя. Для установления связи между отпечатком капель и фактическим их диаметром была использована тарировочная кривая (рисунок 3.4) [44, 142].

Для настройки дождевальной насадки на требуемый расход воды и давление необходимо знать диаметр сопла и калиброванного отверстия регулировочного переходника. При исследовании дождевальной насадки изменяли диаметр выходного сопла и диаметр отверстия переходника с интервалом 0,5 мм, а также фиксировали давление на выходе струи из сопла и перед насадкой.

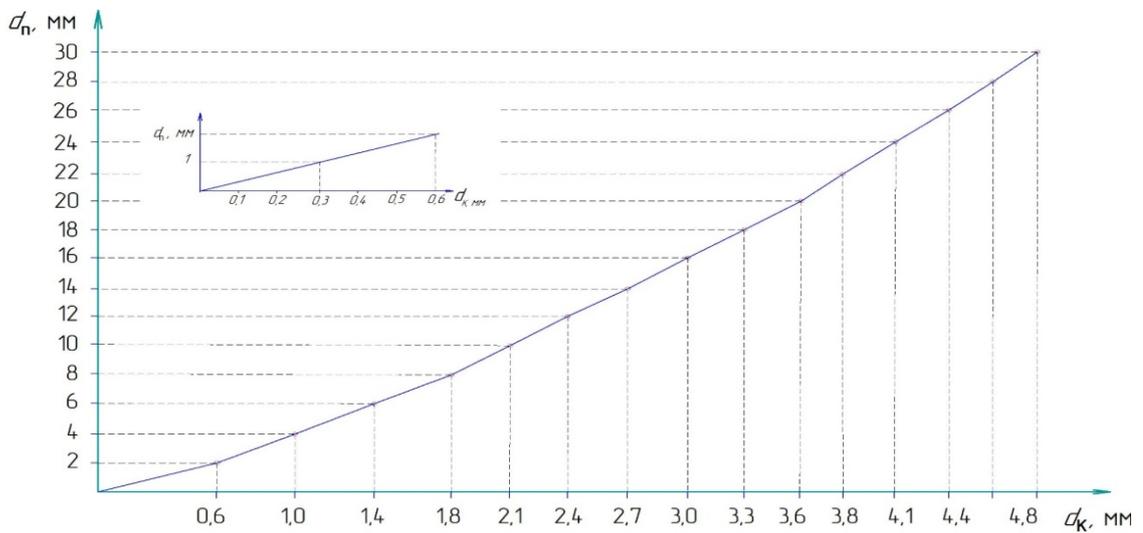


Рисунок 3.4 – Зависимость изменения крупности капель дождя от диаметра отпечатка на бумажном фильтре

При исследовании равномерности полива и интенсивности дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой мерные емкости устанавливали по створам с небольшим центральным углом (рисунок 3.5, *а*) или по квадратной сетке с интервалом 0,5–1,0 м (рисунок 3.5, *б*).

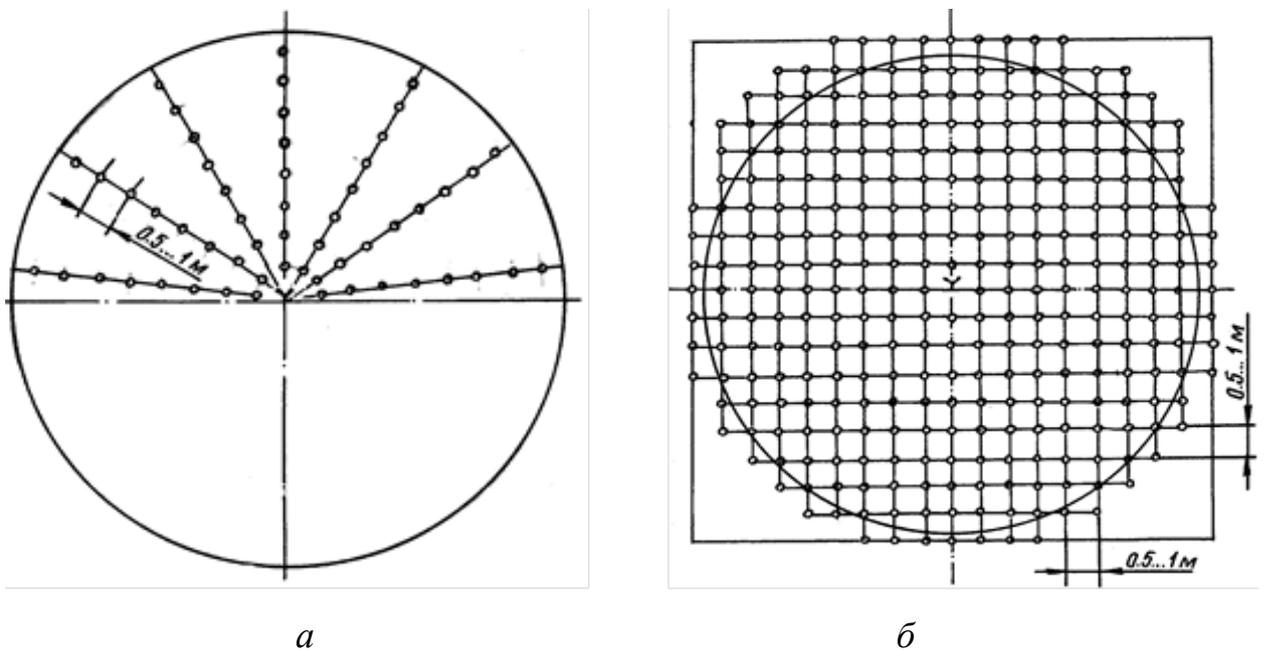


Рисунок 3.5 – Размещение мерных емкостей вдоль радиуса полива (*а*) с небольшим центральным углом и по квадратной сетке (*б*) для оценки равномерности полива дождевальной насадкой

Для оценки равномерности полива дождевальной насадкой удобно использовать нормативную эпюру распределения дождя:

$$\rho' = \frac{\rho_i}{\rho_c}, \quad (3.5)$$

где ρ_c – средняя интенсивность дождя вдоль радиуса полива, мм/мин;

ρ_i – интенсивность дождя в i -й точке радиуса полива, мм/мин.

Равномерность полива дождевальной насадкой определяли по эпюре распределения интенсивности дождя вдоль радиуса полива. При этом использовали следующие параметры:

1. Коэффициент эффективности полива, который рассчитывали по СТО АИСТ 11.1–2010 [142] при условии, что на площади полива сделано более 100 замеров.

2. Коэффициент неравномерности полива дождевальной насадкой. Его вычисляли по модернизированной формуле Б.М. Лебедева [75]:

$$K_n = \frac{\sum (|\rho_i - \rho_c|) K_i}{\rho_c \sum K_i}, \quad (3.6)$$

где K_i – коэффициент площади под i -й мерной емкостью, учитывающей i -ю точку радиуса захвата дождем.

3. Коэффициент равномерности полива по Христиансену [142]:

$$\sigma = 100 \left(1 - \frac{\sum |h_i - h_c| / K_i}{h_c n} \right), \quad (3.7)$$

где $|h_i - h_c|$ – абсолютная величина отклонения i -го замера от среднего слоя осадков, мм;

h_c – средний слой осадков, мм;

n – количество замеров.

Распределение интенсивности дождя вдоль радиуса полива вычисляли по методике с использованием β -распределения, разработанной в ВолжНИИГиМ [132]

и уточненной нами в разделе 2.3. Совпадение расчетных и опытных значений эпюр распределения дождя насадкой оценивали χ^2 -критерием [39]:

$$\chi^2 = \sum(\rho_{\phi} - \rho_p)^2 / \rho_p, \quad (3.8)$$

где ρ_{ϕ} , ρ_p – фактическое и расчетное значения интенсивности дождя в i -й точке радиуса захвата площади полива, мм /мин.

3.3 Лабораторно-полевые испытания модернизированных ДМ «Фрегат»

Полевые испытания были проведены на орошаемых полях ОПХ «ВолжНИИ-ГиМ», ЗАО «АФ «Волга», ООО «Березовское» (рисунок 3.6) и др. Насосная станция в ОПХ «ВолжНИИГиМ» содержит два насоса марки СПС-70/80 (с электродвигателем 100 кВт), насос СПС-100/100 (с электродвигателем 160 кВт) и агрегат СПС-200/50 (с электродвигателем 160 кВт). Оросительная сеть выполнена из стальных труб следующих диаметров (длин): 400 мм (600 м); 300 мм (1870 м) и 250 мм (1540 м).

Полив орошаемых участков осуществлялся дождевальными машинами «Фрегат» модификации ДМУ. В зависимости от производственной необходимости с помощью системы задвижек А, В, С, Д на напорном коллекторе насосной станции реализовались различные варианты работы дождевальных машин на северном и южном участках.

Для агротехнической оценки работы ДМ «Фрегат» со среднеструйными дождевальными аппаратами, серийными дефлекторными насадками и устройствами приповерхностного дождевания использовали положения СТО АИСТ 11.1–2010 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей» [142].

Суммарный расход воды Q_m , подаваемой на поле исследуемой дождевальной машиной «Фрегат», рассчитывали как сумму расходов воды отдельными дождевателями Q_d , расходов воды, подаваемой на гидропривод тележек Q_g , и расходов на утечки из труб установки Q_t :

$$Q_m = Q_d + Q_r + Q_t. \quad (3.9)$$

Расход воды определяли объемным способом путем сбора воды в мерный бак с одновременным измерением давления и продолжительности опыта. Воду в мерный бак собирали с помощью приспособления со шлангом, надеваемым на насадку или аппарат. Шланг должен иметь проходное сечение, обеспечивающее безнапорный слив воды в бак. Для прекращения поступления воды в бак шланг отводили в сторону по сигналу. Продолжительность заполнения бака измеряли секундомером с погрешностью ± 1 с. Объем бака должен быть в 10 раз больше секундного расхода воды дождевателем. Максимальный расход воды аппаратом № 4 машины «Фрегат» составил 3,7 л/с, объем бака – 40–50 л. Бак устанавливали по отвесу в строго вертикальном положении. Объем воды в баке замеряли специально тарированной мерной линейкой.

Фактическую среднюю норму полива после прохода ДМ «Фрегат» устанавливали по объему воды, подаваемой машиной, и рассчитывали по формуле:

$$m_c = 10h_c, \quad (3.10)$$

где h_c – средний слой дождя после прохода машины, мм.

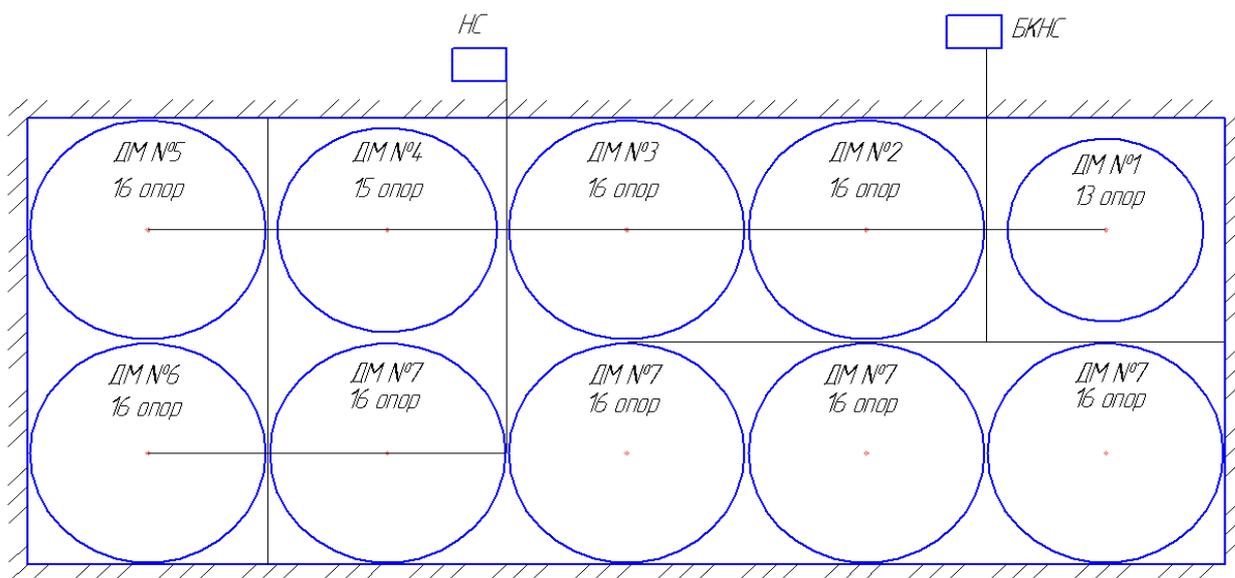


Рисунок 3.6 – Размещение ДМ «Фрегат» на оросительной системе
ООО «Березовское» Энгельсского района

Для оценки равномерности полива и распределения интенсивности дождя на орошаемом поле устанавливали мерные емкости, расставляя их вдоль радиуса полива по 2–3 створам с углом 30 град. и на расстоянии от 0,5 до 3 м друг от друга (рисунок 3.7; 3,8). Объем воды в мерных емкостях определяли мензуркой, время их заполнения и продолжительность исследования фиксировали секундомером (ГОСТ 1197–70). Скорость и направление ветра измеряли в течение опыта на высоте 2 м от поверхности почвы в непосредственной близости от испытываемой машины. Отсчет показаний анемометра проводили с интервалом 10 мин. Данные анемометра заносили в специальную ведомость. Скорость ветра v_b , м/с, вычисляли по формуле:

$$v_b = \frac{a}{t_c} c, \quad (3.11)$$

где a – разность между начальным и конечным показаниями анемометра;

t_c – продолжительность работы счетчика анемометра, с;

c – переводной множитель (берется из паспорта анемометра).

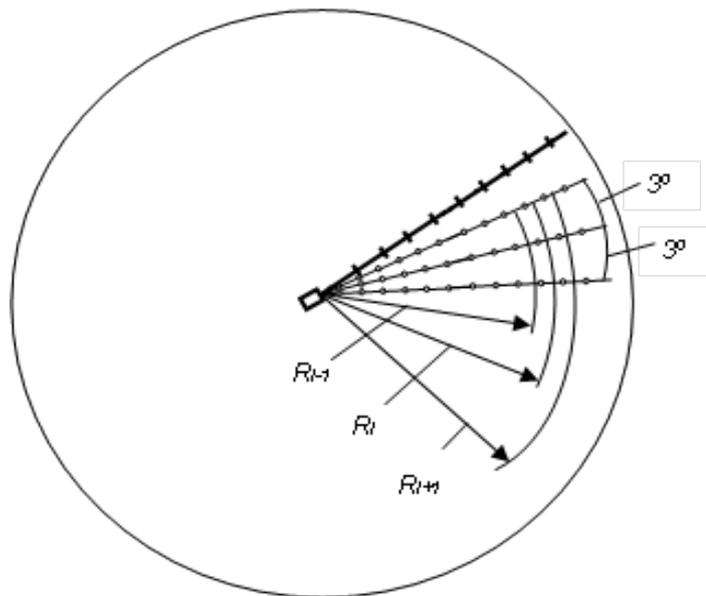


Рисунок 3.7 – Схема расстановки мерных емкостей для анализа равномерности полива ДМ «Фрегат» с учетом коэффициента площади под i -й мерной емкостью

Коэффициенты эффективности, недостаточности и избыточности полива машиной «Фрегат» устанавливали по частотному графику распределения осадков на орошаемом поле [142]. Для расчета частотного графика учитывали величины коэффициента площади под каждой мерной емкостью, которые определяли по их положению относительно центра вращения машины [132]. Площадь под i -й мерной емкостью (рисунок 3.7) при установке емкостей в ряд определяли по уравнению:

$$S_i = \pi(R_{i+1}^2 + R_i^2)B^{-1}, \quad (3.12)$$

где R_i, R_{i+1} – радиусы от центра вращения неподвижной опоры до центра интервала между $i + 1$ и i -й мерной емкостью, м.



Рисунок 3.8 – Расстановка мерных емкостей для исследования равномерности и качества полива ДМ «Фрегат»

Коэффициент K_i площади под i -й мерной емкостью – это отношение площади i -го кольца к площади первого кольца:

$$K_i = \frac{S_i}{S_1}. \quad (3.13)$$

Величины коэффициента площади K_i подчиняются арифметической прогрессии. Для мерных емкостей 1, 2, 3, 4, 5, ..., n принимаются целые значения $K_i = 1, 3, 5, 7, 9, \dots, K_n$.

Равномерность полива определяли по частотному графику, для построения которого выполняли следующие действия:

1. Вычислили слой осадков в каждой мерной емкости

$$h = \frac{10V}{F}, \quad (3.14)$$

где h – слой осадков, мм;

V – объем воды в мерной емкости, мл;

F – площадь под мерной емкостью, см².

2. Учитывая все измерения слоя осадков, определили его наименьшее h_{\min} и наибольшее h_{\max} значения, после чего установили величину интервала по формуле:

$$J = \frac{h_{\max} - h_{\min}}{10...12}, \quad (3.15)$$

где 10...12 – установленное количество интервалов.

3. Используя зависимость (3.13), рассчитали коэффициент площади K_i под каждой мерной емкостью.

4. Выполнив расчеты, оформили вспомогательную таблицу 3.1, в графы 5 и 6 внесли расчетные значения суммы коэффициентов площади K_i и объема воды по каждому интервалу.

5. Используя значения таблицы 3.1, построили частотный график (рисунок 3.9) распределения слоя дождя. На частотном графике указали средний слой дождя и от него в допустимых пределах ($\pm 25\%$) отклонения $0,75 h_c$ и $1,25 h_c$, которые определяют площадь эффективного полива $F_{\text{эф}}$. Слева от нее – площадь недостаточного полива $F_{\text{н}}$, справа – площадь избыточного полива $F_{\text{из}}$. Численные значения этих площадей определяли планиметрированием частотного графика. Отно-

шение указанных площадей к общей площади, равной $F_{об} = F_{эф.п} + F_{н.п} + F_{из.п}$, дает соответствующие значения коэффициентов распределения дождя [132].

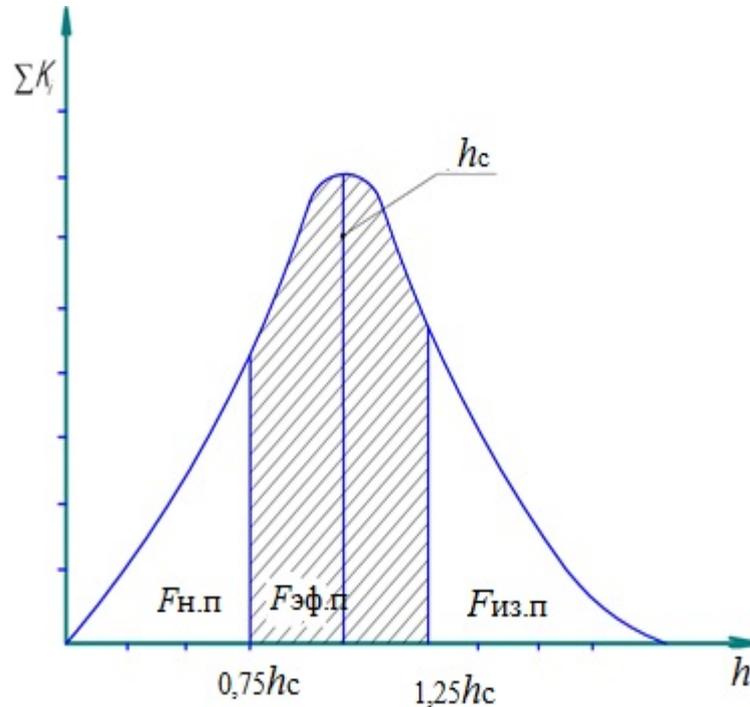


Рисунок 3.9 – Динамика нормы полива после прохода ДМ «Фрегат» на орошаемом поле

Таблица 3.1 – Значения распределения дождя для определения коэффициента равномерности полива

Номер интервала	Интервал слоя дождя, мм	Средняя величина слоя дождя, мм	Число измерений данного объема воды	Сумма коэффициентов площади $\sum K_i$	Суммарный объем воды по каждому интервалу
1	2	3	4	5	6

Если замеры проводили всего на нескольких пролетах машины, где число мерных емкостей составляло 25–45 шт. то равномерность распределения воды на орошаемом участке оценивали по величине коэффициента вариации [39]:

$$K_v = (\sigma/h_c) \cdot 100 \%, \quad (3.16)$$

где σ – среднеквадратичное отклонение, $\sigma = \left[\frac{(h_i - h_c)^2}{n-1} \right]^{0,5}$;

h_i, h_c – слой дождя в i -й мерной емкости и его средняя величина на площади орошения, мм;

n – количество замеров слоя осадков.

Давление воды на входе в машину измеряли манометром (ГОСТ 2405–88) и фиксировали его на бумажном диске самописца. Анемометром (ГОСТ 6376–74), который устанавливали на расстоянии 50–150 м от зоны полива машиной на высоте 2 м, определяли скорость ветра в течение опыта.

Расчетную поливную норму для ДМ «Фрегат» вычисляли по формуле [66]:

$$m_p = 5,5 \frac{m_{\min}}{n}, \quad (3.17)$$

где m_{\min} – норма полива данной машиной при максимальном числе ходов гидроцилиндра последней тележки 5,5 в минуту, мм;

n – фактическая цикличность гидроцилиндра последней тележки, ход/мин.

Значения потерь воды на испарение при полете капель и уносе их ветром рассчитали по уравнению [142, 153]:

$$E_{и.у} = \frac{m_p - m_{\phi}}{m_{\phi}} \cdot 100 \%, \quad (3.18)$$

где m_p, m_{ϕ} – расчетная и фактическая поливные нормы, мм.

Фактическую поливную норму устанавливали с помощью мерных емкостей и мензурки сразу после прохода машины по полю.

Расчетную поливную норму определяли как среднюю в зоне полива дождевальным аппаратом (насадкой):

$$m_p = \frac{6qR_r}{\ln R_a}, \quad (3.19)$$

где q – расход воды дождевальным аппаратом, устройством приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой л/с;

R_r, R_a – расстояние от центра вращения машины до последней тележки и до УПД с дождевальными насадками, м;

ℓ – путь передвижения последней тележки за один ход гидроцилиндра,
 $\ell = 0,164$ м.

n – фактическая цикличность цилиндра привода последней тележки, ход/мин;

Среднюю интенсивность дождя с перекрытием струй воды при монтаже серийных дефлекторных насадок на ДМ «Фрегат» вычисляли по зависимости:

$$\rho_c = \frac{60q}{2R\ell} = \frac{30q}{R\ell}. \quad (3.20)$$

Частота засорения насадки \mathcal{C}_3 среднеструйного дождевального аппарата или дождевальной насадки в полевых условиях.

$$\mathcal{C}_3 = (N_3/N) \cdot 100 \%, \quad (3.21)$$

где N_3 , N – количество засоренных и общее число насадок с разными диаметрами на исследуемых установках по окончанию поливного сезона, шт.

Долю наносов, отложений и мусора различных размеров в трубопроводе машины определяли с помощью набора сит (ГОСТ 25584–83).

Влажность почвы устанавливали с использованием почвенного бура и бокса термостатно-весовым способом [39, 142]. Почву до и после поливов в слое 0–100 см через каждые 10 см отбирали буром в трехкратной повторности. Влажность почвы B , %, вычисляли делением массы испарившейся влаги a на массу высушенной почвы в стаканчике v :

$$B = \frac{100a}{v}, \quad (3.22)$$

где B – полевая влажность, %;

a – масса испарившейся влаги, г;

v – масса высушенной почвы, г.

Новые дождевальные насадки с обратным конусом, смонтированные на УПД, по сравнению со среднеструйными аппаратами или серийными дефлекторными насадками, установленными на трубопроводе машины, испытывали на полях в ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», ЗАО «АФ «Волга», ООО «Березовское». На ДМ «Фрегат» устанавливали различные типы дождевателей [39]. Схема их размещения на

машинах (хозяйство № 4) в ООО «Березовское» приведена на рисунке 3.10. Для обеспечения одновременного полива по вариантам опытные участки размещали вдоль трубопровода ближе к концу ДМ «Фрегат» (рисунок 3.11). Площадь опытного участка – 50 м², всего на орошаемой площади было выделено 8 створов.

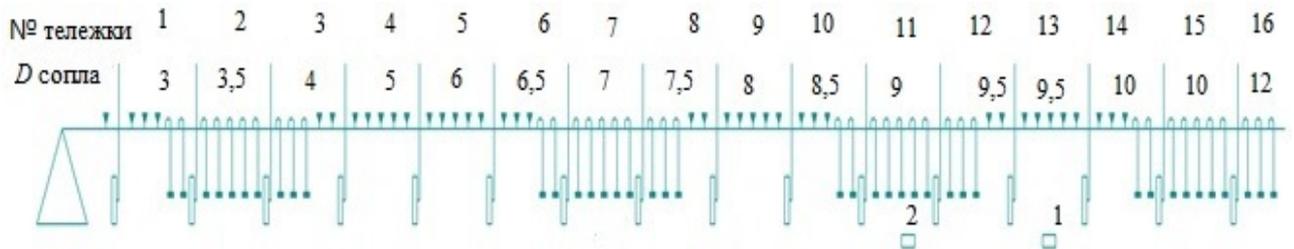


Рисунок 3.10 – Монтаж стандартных дефлекторных насадок (1) и новых устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками (2) на ДМ «Фрегат»

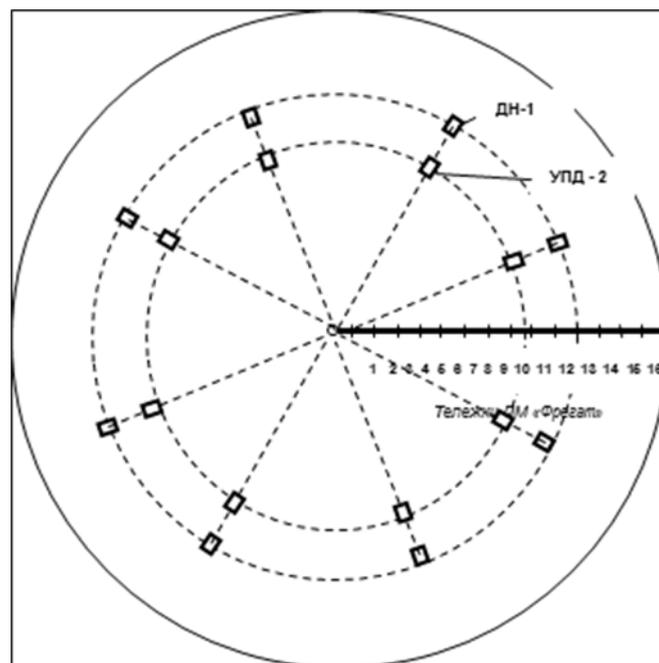


Рисунок 3.11 – Расположение учетных площадок на орошаемом поле с дождевальной машиной «Фрегат» при поливе дефлекторными насадками (1) и новыми устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками (2): I...IV – номера створов; 1...16 – номера тележек

При определении расположения учетных делянок учитывали однородность почвенного покрова, микрорельеф поля и особенности возделывания сельскохозяйственных культур.

Биологический урожай сои в ООО «Березовское» определяли на делянках размером 1 м². Каждая делянка поливалась определенным видом дождевателя. Повторность опытов – восьмикратная.

При исследовании эксплуатационных параметров работы машин «Фрегат» устанавливали:

1. Чистую производительность машины за час работы [37, 75, 142]:

$$P_{\text{ч}} = \frac{3,6Q_{\text{м}}K_{\text{и}}}{m(1+0,01E_{\text{и.у}})}, \quad (3.23)$$

где $P_{\text{ч}}$ – часовая производительность машины, га/ч;

$Q_{\text{м}}$ – расход воды машиной, л/с;

$K_{\text{и}}$ – коэффициент использования машины;

m – норма полива, м³/га;

$E_{\text{и.у}}$ – потери воды на испарение и унос ветром, %.

2. Общий расход воды, подаваемый машиной, вычисляли как сумму расходов устройствами приповерхностного дождевания $Q_{\text{а}}$ и расходов воды через гидроцилиндры тележек $Q_{\text{г}}$:

$$Q_{\text{м}} = Q_{\text{а}} + Q_{\text{г}}. \quad (3.24)$$

Экономические показатели использования машин «Фрегат» определяли в соответствии с положениями ГОСТ Р 53056–2008. [33]:

1. Затраты труда на единицу выполняемого объема работ [37]:

$$Z = \frac{n}{P_{\text{ч}}K_{\text{и}}}, \quad (3.25)$$

где n – количество человек, занятых на обслуживании одной машины.

2. Эксплуатационные издержки на полив I , руб./га [37]:

$$I = Z + A + P + C + X, \quad (3.26)$$

где Z – затраты труда при эксплуатации дождевальнoй машины, руб./га;

A – амортизациoнные отчисления, руб./га;

P – расходы на ремонт и техническое обслуживание машины, руб./га;

C – стоимость горюче-смазочных материалов, руб./га;

X – расходы на хранение машины, руб./га.

3.4 Математическая обработка экспериментальных материалов и их статистическая оценка

Достоверность опытных измерений оценивали с использованием метода математической статистики [39, 80, 111] и теории случайных ошибок [80].

Среднюю величину распределения результатов измерений вычисляли делением суммы отдельных измерений на их количество:

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}, \quad (3.27)$$

где X_i – отдельное измерение;

n – число измерений.

Дисперсию распределения результатов измерений рассчитывали делением суммы квадратов отклонений отдельного измерения от средней величины \bar{O} на общее число измерений минус единица:

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

Среднеквадратичное отклонение определяли как квадратный корень из дисперсии распределения:

$$\sigma = D^{0.5}. \quad (3.29)$$

Коэффициент вариации, %, вычисляли делением среднеквадратичного отклонения, умноженного на 100 %, на среднюю величину распределения:

$$K_v = \frac{100\sigma}{\bar{X}}. \quad (3.30)$$

Точность опыта устанавливали по формуле:

$$P = \frac{100\sigma}{\bar{X}n^{0,5}}. \quad (3.31)$$

Для определения корреляционной связи между различными параметрами работы дождевальных машин проводили n -е число парных наблюдений и вычисляли коэффициент парной корреляции.

Коэффициенты регрессии математических уравнений рассчитывали с использованием метода наименьших квадратов:

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

где Y_i – фактическое значение зависимого показателя;

Y_p – расчетные значения, найденные из уравнения регрессии.

Для расчета коэффициента линейного уравнения B_{xy} использовали зависимость:

$$\bar{Y} = Y_i - B_{xy}(X_i - \bar{X}), \quad (3.33)$$

где X, Y – средние арифметические для ряда замеров X_i, Y_i .

Тогда:

$$B_{xy} = \frac{\sum (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum (X_i - \bar{X})^2}. \quad (3.34)$$

Линейное уравнения было применено для определения дальности полета струи и расхода воды дождевальной насадкой с обратным конусом.

Для расчета эпюры распределения дождя на площади полива дождевальной насадкой применяли β -распределение [155]:

$$F_{(R)} = \begin{cases} \frac{F(\gamma + \eta)}{F(\gamma)F(\eta)} R^{\gamma-1} (1-R)^{\eta-1}; 0 \leq R \leq 1; \eta > 0; \gamma > 0 \\ 0 \end{cases}. \quad (3.35)$$

Расчет коэффициентов γ и η проводили с использованием средней величины распределения \bar{X} и среднеквадратичного отклонения σ по следующим зависимостям:

$$\eta = \frac{(1-\bar{X})}{\sigma^2} [\bar{X}(1-\bar{X}) - \sigma^2]; \quad (3.36)$$

$$\gamma = \frac{\bar{X}\eta}{1-\bar{X}}. \quad (3.37)$$

Дальность полета струи, которой соответствует максимальная величина слоя осадков, устанавливали по формуле:

$$\left(\frac{X_i}{R} \right)_{\max} = \frac{\gamma-1}{(\gamma + \eta + 2)}. \quad (3.38)$$

Относительную ошибку при определении расчетных и фактических величин вычисляли по формуле [39]:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{Y_{\phi_i} - Y_{p_i}}{Y_{p_i}} \right| 100 \%. \quad (3.39)$$

Остаточная дисперсия:

$$D_{\text{ост}}^2 = \sum (Y_{\phi_i} - Y_p)^2 / (N - V - 1), \quad (3.40)$$

где Y_{ϕ_i} – фактическая величина измерения;

Y_p – расчетная величина;

N – количество замеров;

V – количество факторов.

Оценку достоверности уравнения регрессии проводили по критерию Фишера [39, 80]:

$$F = D^2 / D_{\text{ост}}^2, \quad (3.41)$$

где D^2 – общая дисперсия,

$$D^2 = \sum(Y_i - Y)^2 / (N - 1). \quad (3.42)$$

Коэффициент множественной корреляции [39, 80]:

$$R_m = (1 - D_{\text{ост}}^2 / D^2)^{0,5}. \quad (3.43)$$

3.5 Выводы

1. Составлена программа лабораторных и полевых исследований разработанных дождевальных насадок и устройств приповерхностного дождевания для ДМ «Фрегат».

2. Для оценки показателей полива дождевальной насадкой с обратным конусом определена ее расходно-напорная характеристика: дальность полета струи и высота ее подъема, крупность капель дождя, распределение его на площади полива в зависимости от конструктивных и технологических параметров насадки с использованием положений СТО АИСТ 11.1–2010.

3. При исследовании устройств приповерхностного дождевания учтена масса груза, обеспечивающего устойчивое вертикальное положение дождевальной насадки и удобное регулирование ее по высоте расположения, а также надежность их работы и стоимость.

4. При испытании модернизированной ДМ «Фрегат» определены технические и показатели качества полива: расход воды и влияние на него давления, рав-

номерность полива при ветре, потери воды при поливе в зависимости от метеорологических факторов и конструктивных параметров, энергетическое воздействие дождя на плотность почвы.

5. Для оценки экономической эффективности работы ДМ «Фрегат» рассчитаны урожайность сельскохозяйственных культур, экономический эффект от внедрения усовершенствованных устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками и срок их окупаемости.

6. Математическая обработка результатов исследования и оценка их достоверности проведена с использованием методов математической статистики и теории случайных чисел.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ МОДЕРНИЗИРОВАННОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ НАСАДКИ

4.1 Расход воды устройством приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой

Для определения расхода воды дождевальной насадкой с обратным конусом измеряли следующие параметры: диаметр насадки – штангенциркулем; давление на выходе струи из сопла – трубкой Пито с манометром; объем воды в мерном баке – тарированной линейкой; время подачи воды в мерный бак – секундомером.

Вода из дождевальной насадки в мерный бак подавалась по шлангу заборного колпака (рисунок 3.2).

Результаты исследований (таблица 4.1) показали, что при увеличении диаметра насадки с 2,2 до 12 мм и давления с 0,1 до 0,3 МПа расход воды возрастает с 0,048 до 2,48 л/с, что соответствует расходу воды струйными аппаратами № 1, 2 и 3 ДМ «Фрегат».

Среднее значение коэффициента расхода воды насадкой с обратным конусом составляет 0,904. Зависимость для расчета расхода воды дождевальной насадкой принимает вид:

$$q = \frac{\mu D^2 (P)^{0,5}}{287,595} = \frac{D^2 (P)^{0,5}}{31,8}, \quad (4.1)$$

где q – расход воды, л/с;

μ – коэффициент расхода воды;

D – диаметр сопла насадки, мм;

P – давление водяной струи, МПа.

Расходно-напорная характеристика дождевальной насадки с обратным конусом приведена на рисунке 4.1. Результаты исследований показывают, что коэффициент расхода воды дождевальной насадкой, установленной на УПД, составляет 0,904, что на 3,7 % выше его значений при монтаже серийных насадок на трубопроводе машины. Это связано с тем, что к серийной насадке осуществ-

ляется боковой подвод воды, а к устройствам приповерхностного дождевания, установленным на трубопроводе машины, – прямой по трубам и рукавам.

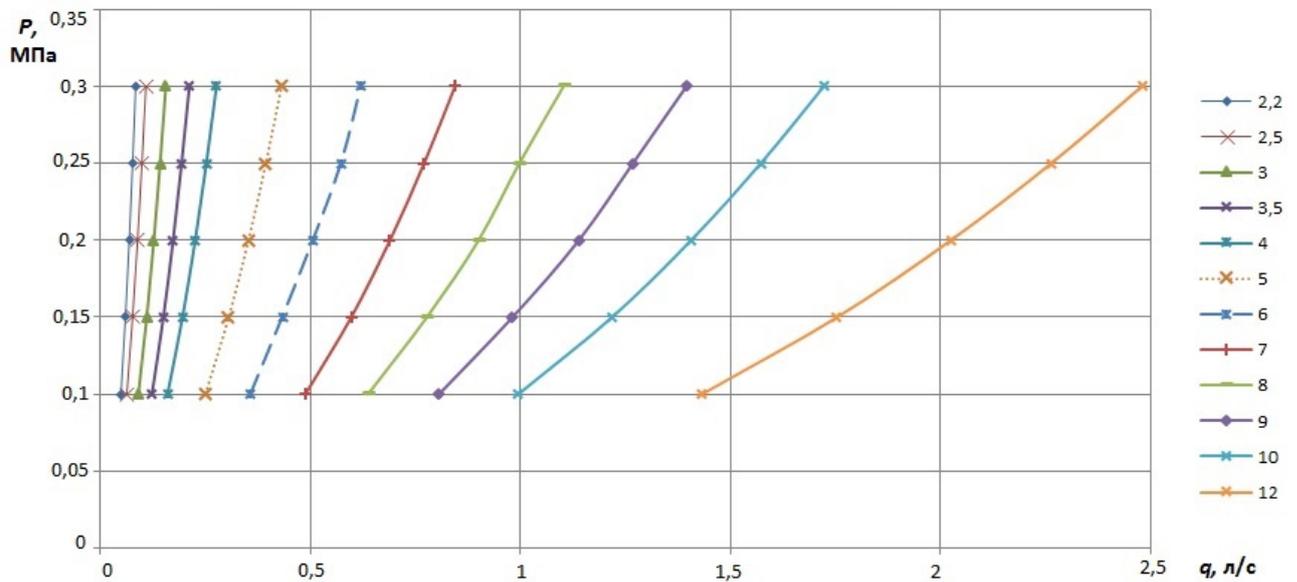


Рисунок 4.1 – Расходно-напорная характеристика дождевальной насадки с обратным конусом на устройствах приповерхностного дождевания

Таблица 4.1 – Расход воды устройством приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой, имеющей различные диаметры

Диаметр насадки, мм	Давление на выходе струи из сопла, МПа,	Объем воды в мерном баке, л	Время заполнения мерного бака, с	Расход воды насадкой q_n , л/с	Коэффициент расхода воды μ
2,2	0,1	50	1039	0,048	0,904
2,2	0,2	49	719	0,068	0,905
2,2	0,3	50	600	0,083	0,903
2,5	0,1	50	803	0,062	0,905
2,5	0,2	48	546	0,087	0,904
2,5	0,3	50	464	0,107	0,904
3,0	0,1	50	559	0,089	0,903
3,0	0,2	49	386	0,126	0,906
3,5	0,1	50	410	0,121	0,905
3,5	0,2	49	284	0,172	0,903
3,5	0,3	48	227	0,211	0,905
4,0	0,1	49	308	0,159	0,904
4,0	0,2	50	222	0,224	0,904
4,0	0,3	50	181	0,275	0,903
5,0	0,1	49	196	0,249	0,906

Продолжение табл. 4.1

5,0	0,2	48	136	0,351	0,904
5,0	0,3	49	113	0,430	0,905
6,0	0,1	49	137	0,357	0,903
6,0	0,2	49	97	0,506	0,905
6,0	0,3	50	80	0,619	0,904
7,0	0,1	49	100	0,487	0,904
7,0	0,2	48	70	0,688	0,903
7,0	0,3	49	58	0,845	0,906
8,0	0,1	50	78	0,636	0,904
8,0	0,2	49	54	0,902	0,907
8,0	0,3	48	43	1,103	0,905
9,0	0,1	50	62	0,805	0,904
9,0	0,2	49	43	1,138	0,904
9,0	0,3	48	34	1,396	0,905
10,0	0,1	48	48	0,992	0,903
10,0	0,2	47	33	1,405	0,904
10,0	0,3	46	26	1,721	0,904
12,0	0,1	48	33	1,431	0,903
12,0	0,2	47	23	2,025	0,904
12,0	0,3	46	18,5	2,480	0,904
				Среднее	0,904

4.2 Снижение давления воды по длине устройства приповерхностного дождевания сборного типа

Для определения потерь давления по длине устройства приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой, имеющей регулировочный переходник, измеряли следующие параметры: диаметр насадки и регулировочного переходника – штангенциркулем; давление в трубопроводе, перед насадкой и на выходе струи из сопла – трубкой Пито с манометром. Исследования проводили на УПД сборного типа, включающих в себя стальную трубу ($D_y = 15$ мм) и напорный рукав диаметром 18 мм или сборную штангу из труб ($D_y = 15$ мм).

Данные о потерях давления в трубопроводе машины, перед дождевальной насадкой и на выходе струи из сопла при исследованиях ДМ «Волга-ФК» и ДМ «Фрегат» в ОПХ «ВолжНИИГиМ» приведены в таблице 4.2.

Зависимость изменения потерь давления по длине устройства приповерхностного дождевания от расхода воды насадкой представлена на рисунке 4.2.

Таблица 4.2 – Изменение потерь давления по длине устройства приповерхностного дождевания в зависимости от расхода воды дождевальными насадками с обратным конусом, смонтированными на ДМ «Волга-ФК» (1) и ДМ «Фрегат» (2)

Тип ДМ	Диаметр, мм		Давление в трубопроводе, МПа	Давление перед насадкой, МПа	Давление на выходе струи, МПа	Потери давления по длине УПД, м	Расход воды насадкой q_n , л/с
	насадки	переходника					
1	3	-	0,2	0,2	0,2	0	0,127
1	3,5	-	0,2	0,19	0,19	1	0,164
1	4,6	-	0,2	0,2	0,2	0	0,30
1	5	-	0,2	0,2	0,2	0	0,354
1	5,5	-	0,2	0,18	0,18	2	0,392
1	6,0	-	0,19	0,16	0,16	3	0,457
1	6,5	-	0,19	0,15	0,15	4	0,569
1	7,0	-	0,19	0,15	0,15	4	0,602
1	7,5	-	0,185	0,14	0,14	4,5	0,660
1	8,0	-	0,185	0,135	0,135	5	0,730
1	8,2	-	0,18	0,13	0,13	5	0,734
1	8,4	-	0,17	0,12	0,12	5	0,735
1	10,0	-	-	-	-	-	-
2	4	6,5	0,359	0,359	0,295	0,1	0,290
	4	6,5	0,357	0,348	0,300	0,9	0,289
2	4	6,5	0,355	0,325	0,320	3,0	0,282
2	5	0	0,350	0,340	0,340	1,0	0,500
	6	7,3	0,340	0,33	0,250	1	0,545
2	7	8,0	0,33	0,32	0,195	1,0	0,714
2	7	8,0	0,33	0,32	0,185	1,0	0,724
2	7	8,0	0,33	0,32	0,185	1,0	0,724
2	8	8,0	0,32	0,30	0,180	2,0	0,823
2	7	-	0,32	0,31	0,310	1,0	0,833
2	8	9,0	0,32	0,28	0,150	4,0	0,769
2	10	9,0	0,31	0,24	0,110	7,0	1,087

Продолжение таблицы 4.2

2	10	–	0,30	–	0,170	10,0	1,388
2	10	–	0,30	–	0,180	12,0	1,315
2	10	–	0,30	–	0,190	11,0	1,388
2	12	–	0,35	0,19	0,190	15,0	2,8

Исследования показали, что при расходе воды, проходящей через УПД, до 1,1 л/с потери давления по его длине увеличиваются до 7 м, а при расходе воды 2,8 л/с – до 15 м.

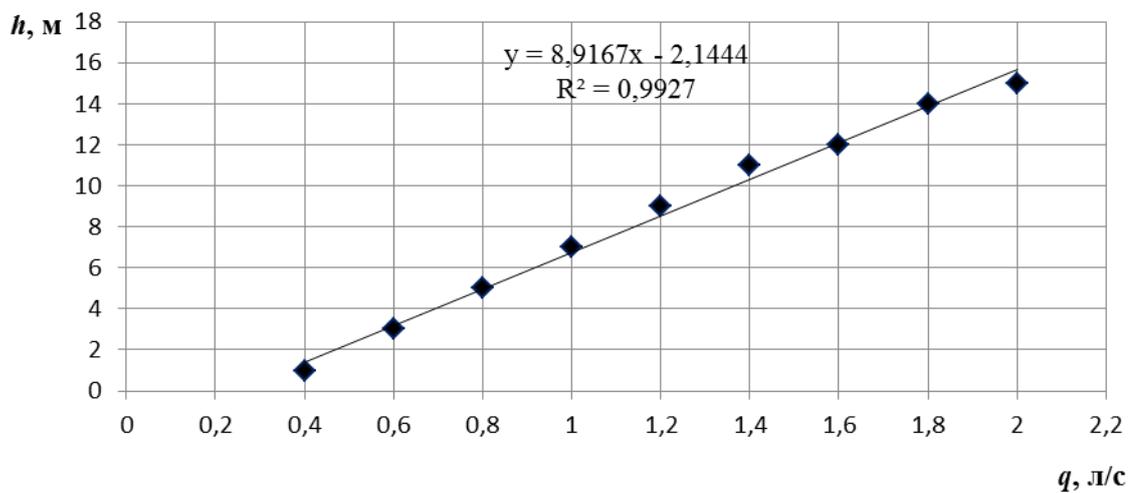


Рисунок 4.2 – Зависимость потерь давления по длине устройства приповерхностного дождевания сборного типа от расхода воды насадкой

При увеличении расхода воды и уменьшении проходного диаметра труб и напорного рукава потери давления по длине устройства приповерхностного дождевания растут.

Для определения потерь давления по длине УПД рекомендуется использовать математическую зависимость:

$$h = -1,488 q_n^2 + 12,488 q_n - 3,890, \quad (4.2)$$

где q_n – расход воды дождевальной насадкой, л/с.

Исследованиями установлено, что для обеспечения небольших потерь давления в трубопроводе при расходе воды дождевальной насадкой от 0,1 до 1,0 л/с

УПД должно быть изготовлено из труб с внутренним диаметром 15 мм. Потери давления по длине УПД необходимо учитывать для расчета расхода воды и качественных показателей полива дождевальной насадкой.

4.3 Дальность полета струи при поливе дождевальной насадкой с обратным конусом

Лабораторные исследования дождевальной насадки с обратным конусом показали, что дальность полета струи зависит от диаметра сопла, давления перед насадкой, высоты ее расположения над поверхностью поля (рисунок 4.3, приложение В).

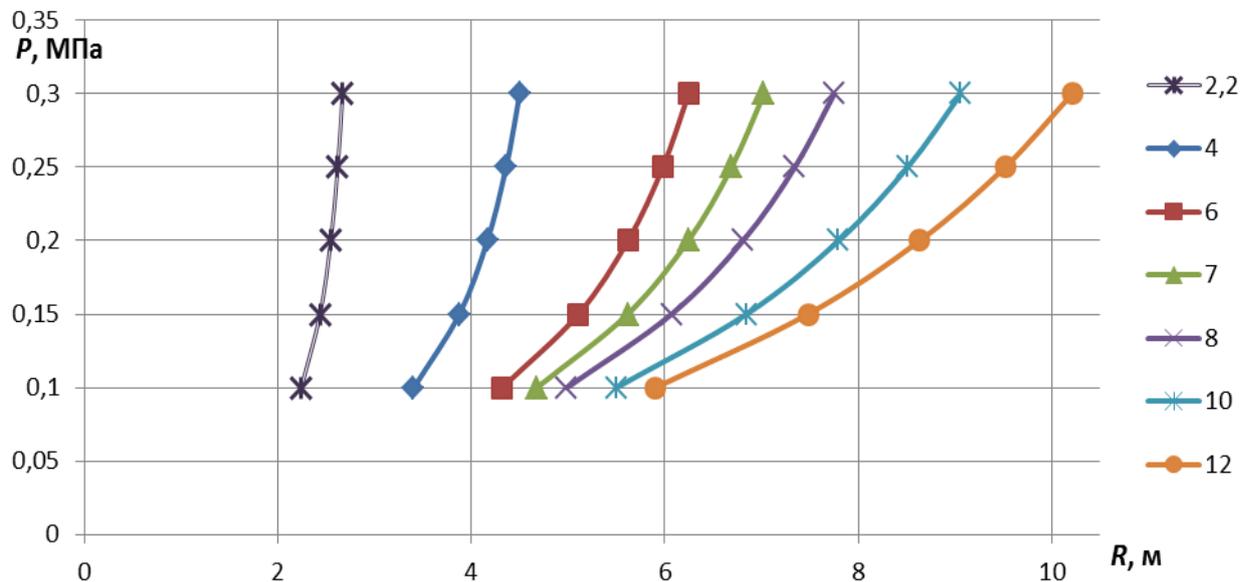


Рисунок 4.3 – Экспериментальные значения радиуса полива R дождевальной насадкой от диаметра сопла D и давления струи P перед насадкой при высоте ее установки 2,0 м от поверхности земли

Максимальная дальность полета струи возрастает с 4,3 до 10,1 м с увеличением диаметра сопла от 4 до 12 мм при давлении 0,3 МПа. Математической обработкой экспериментальных данных (таблица 1 приложения В) установлена зависимость радиуса полива R дождевальной насадкой, размещенной на высоте 2,0 м от поверхности почвы:

$$R = 100PD (0,96 + 0,02h) / (1,073 D + 74,6 P), \quad (4.3)$$

где h – высота монтажа дождевальной насадки (изменяется от 1,0 до 2,5 м);

P – давление на выходе струи из сопла, МПа;

D – диаметр сопла, мм.

Коэффициент детерминации данной зависимости составил 0,83.

Устройства приповерхностного дождевания с дождевальными насадками следует устанавливать на 25- и 30-метровых пролетах машины на расстоянии ℓ соответственно через 5 и 6 м друг от друга для обеспечения высокой равномерности полива. Отсюда степень перекрытия струй R/ℓ у дождевальных насадок при ветре в начале дождевальной машины выше, чем у среднеструйных аппаратов. Это вызвано снижением высоты подъема дождевых струй и ветровой нагрузки на них, в результате чего повышается равномерность полива дождевальной машиной «Фрегат».

В конце трубопровода ДМ «Фрегат» степень перекрытия струй дождевальных насадок, размещенных на УПД, увеличивается до 1,6. Однако при обычной установке дефлекторных насадок на трубопроводе в стандартные муфты через 7,5 и 10 м она достигает максимальных значений 0,9...1,05 (таблица 4.3).

4.4 Средняя и мгновенная интенсивность дождя при поливе дождевальной насадкой и ее распределение вдоль ДМ «Фрегат»

Мгновенная интенсивность дождя так же, как и средняя, оказывает значительное энергетическое воздействие на почву и норму полива до стока. Среднюю интенсивность дождя определяли делением расхода воды q на площадь мгновенного полива среднеструйным аппаратом L_c по формуле (3.3).

Дальность полета струи дождевальной насадки вдоль машины «Фрегат» изменяется от 3,3 до 10,2 м, поэтому средняя интенсивность дождя увеличивается от 0,15 до 1,08 мм/мин (таблица 4.3, рисунок 4.4). При этом она значительно ниже, чем при поливе среднеструйными аппаратами (рисунок 4.6).

Таблица 4.3 – Агротехнические характеристики полива ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-463-90 со среднеструйными аппаратами, дефлекторными насадками и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками

Тип дождевателя	Число дождевателей на пролете k	Расход воды дождевателем q , л/с	Диаметр основного и дополнительного сопла D, D_d , мм	Давление на выходе струи из сопла P , МПа	Угол вылета струи θ , град.	Частота вращения дождевателя, мин^{-1}	Радиус полива вращающейся струей R_v , м	Ширина захвата дождем B_v , м	Степень перекрытия струй R/ℓ	Мгновенная и средняя интенсивность дождя, мм/мин	
										ρ_m	ρ_c
СДА № 1	3	0,192	3,2	0,309	27	3,0	6,0	12	0,6	1,54	0,095
ДН	3	0,192	3,6	0,193	23	0	3,6	7,2	0,48	0,283	0,213
УПД-ДН	5	0,115	3,0	0,15	23	0	3,1	9,2	0,62	0,228	0,150
СДА № 2	3	0,415	3,6–2,4	0,432	27	0,50	10,7	21,4	1,4	1,52	0,112
ДН	3	0,415	5,5	0,169	23	0	4,4	8,8	0,58	0,409	0,377
УПД-ДН	5	0,250	4,0	0,260	23	0	4,3	10,6	1,16	0,258	0,283
СДА № 3	3	1,790	5,6–7,1	0,483	27	1,0	19,9	39,8	1,9	1,92	0,270
ДН	3	1,790	11,0	0,197	23	0	8,1	16,2	0,81	0,521	0,662
УПД-ДН	5	1,020	8,0	0,276	23	0	7,0	17,0	1,41	0,401	0,600
СДА № 4	3	3,780	11,9–5,6	0,420	27	0,66	25,6	51,2	2,56	2,60	0,590
ДН	3	3,780	6,0	0,196	23	0	10,5	21,0	1,05	0,655	1,080
УПД-ДН	5	2,180	12,0	0,250	23	0	9,0	21,0	1,75	0,514	1,038

Примечание. СДА – среднеструйный дождевальный аппарат; УПД-ДН – устройство приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой; ДН – серийная дефлекторная насадка; B_v – ширина захвата дождем с учетом расстановки УПД с ДН на 1,5 м от трубопровода машины м

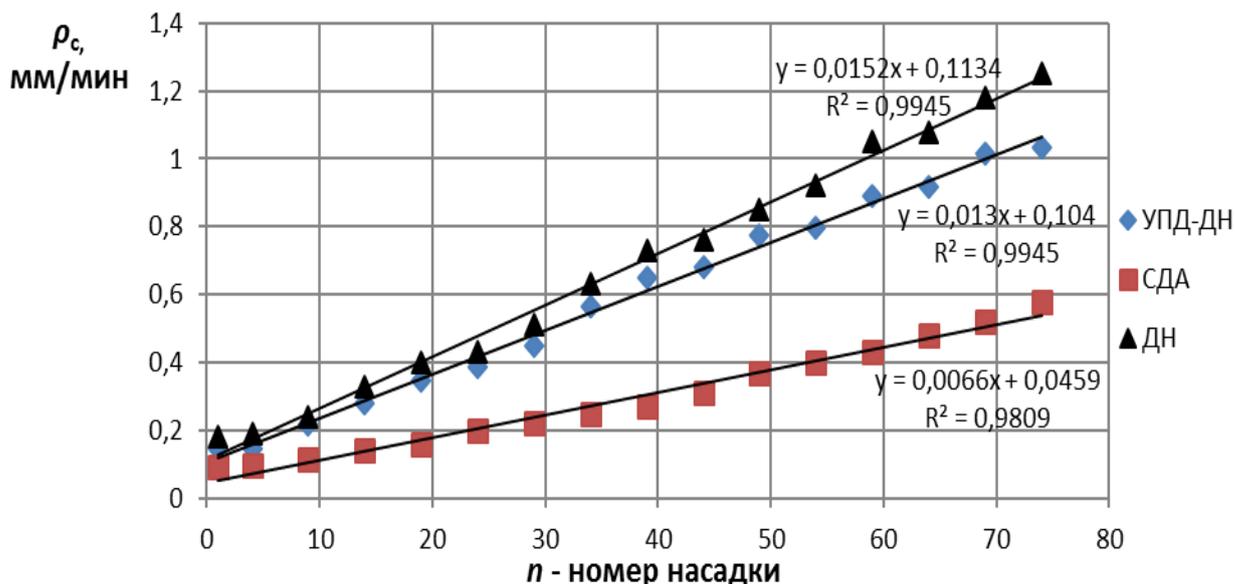


Рисунок 4.4 – Экспериментальные значения средней интенсивности дождя вдоль ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-463-90, оборудованной среднеструйными дождевальными аппаратами, дефлекторными насадками и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками, установленными через 5 и 6 м друг от друга на трубопроводе машины

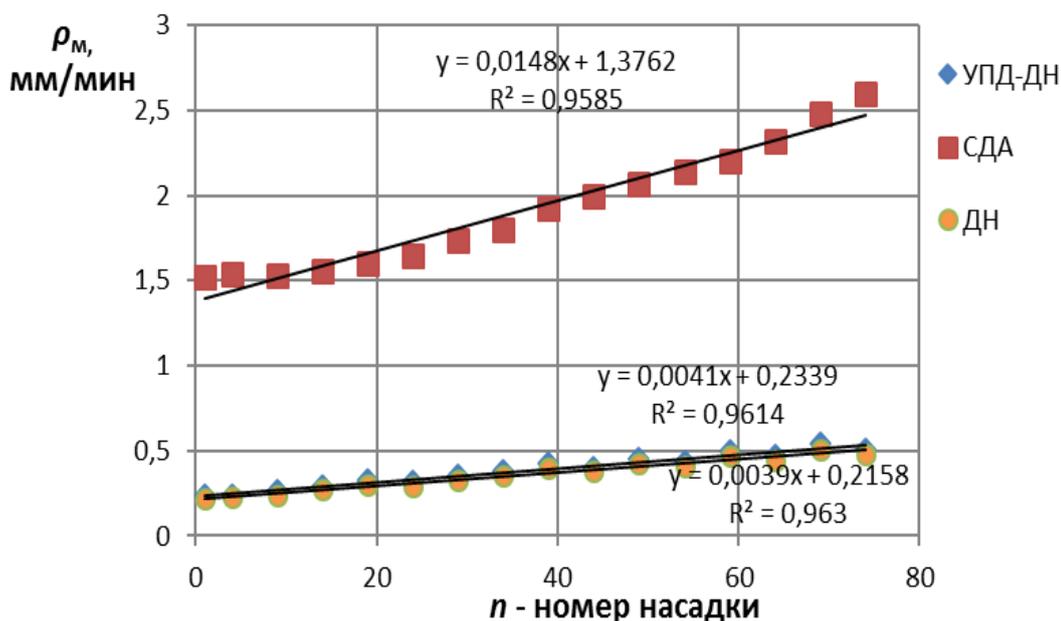


Рисунок 4.5 – Экспериментальные значения мгновенной интенсивности дождя вдоль ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-463-90, оборудованной среднеструйными дождевальными аппаратами, дефлекторными насадками и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками, установленными через 5 и 6 м друг от друга на трубопроводе машины

Мгновенная интенсивность дождя вдоль машины «Фрегат» при поливе СДА изменяется от 1,54 до 2,6 мм/мин, а УПД с насадками – от 0,237 до 0,509 мм/мин, что в 4–6 раз меньше (таблицы 4.3, 4.4, рисунок 4.5.).

Таблица 4.4 – Динамика средней и мгновенной интенсивности дождя при поливе дождевальными насадками с обратным конусом, установленными через 5 и 6 м друг от друга на трубопроводе машины

Номер насадки	Расход воды насадкой, q_n , л/с	Диаметр насадки d_n , мм	Давление на выходе струи P , МПа	Радиус действия струи R , м	Средняя и мгновенная интенсивность дождя, мм/мин	
					ρ_c	ρ_m
1	0,139	3	0,241	3,3	0,143	0,237
4	0,141	3,5	0,133	3,34	0,145	0,241
9	0,248	4	0,242	4,24	0,215	0,262
14	0,356	5	0,205	4,86	0,279	0,287
19	0,462	6	0,166	5,19	0,345	0,327
24	0,57	6	0,253	5,88	0,386	0,314
29	0,680	7	0,194	6,06	0,449	0,353
34	0,952	8	0,223	6,94	0,563	0,377
39	1,108	9	0,189	7,02	0,650	0,429
44	1,264	9	0,246	7,74	0,683	0,402
49	1,436	10	0,208	7,77	0,774	0,453
54	1,574	10	0,250	8,34	0,799	0,431
59	1,728	11	0,206	8,17	0,892	0,493
64	1,884	11	0,245	8,78	0,916	0,466
69	2,030	12	0,201	8,48	1,015	0,539
74	2,196	12	0,233	9,05	1,035	0,509

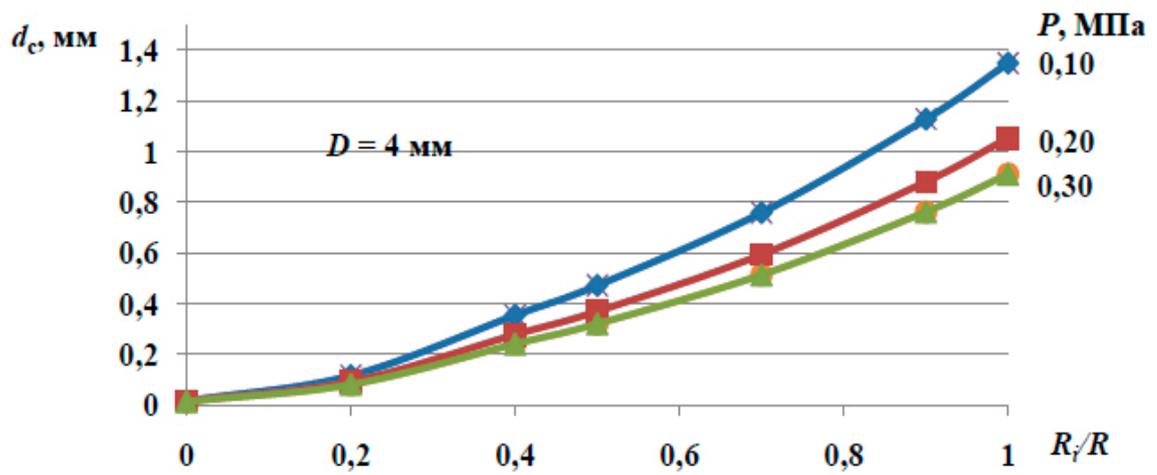
Таким образом, проведенные исследования дождевальных насадок с обратным конусом, смонтированных на устройствах приповерхностного дождевания, позволили установить способы увеличения дальности полета струй и степени их перекрытия при ветре, что обеспечило повышение равномерности полива в первой части трубопровода машины и снижение мгновенной интенсивности дождя во второй (концевой) его части.

4.5 Крупность капель дождя, создаваемая дождевальными насадками с обратным конусом

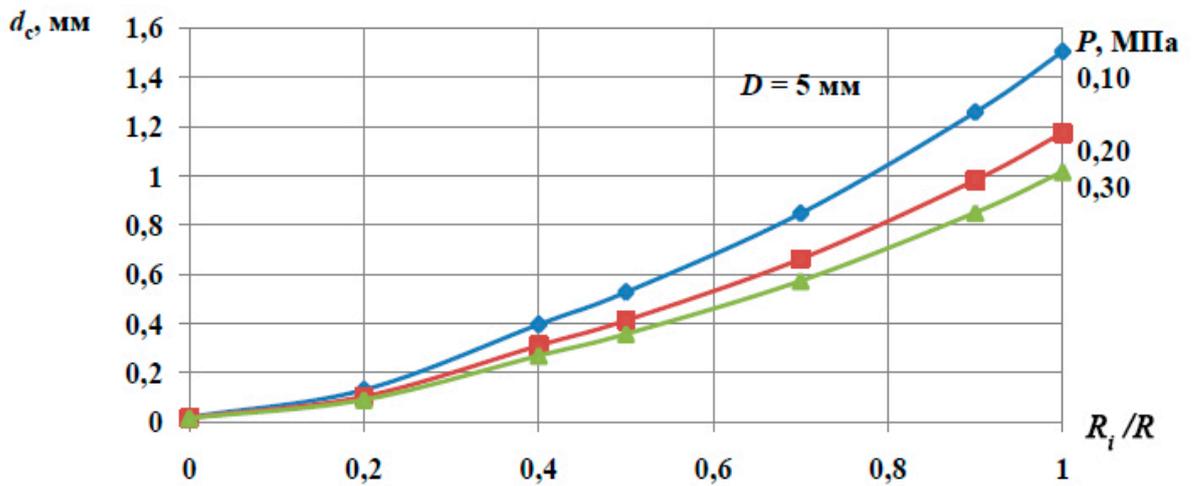
На крупность капель дождя вдоль радиуса полива насадкой влияет изменение диаметра сопла и давления (таблица 4.5, рисунок 4.6, а, б, в, г, д).

Таблица 4.5 – Зависимость среднего диаметра капель дождя d_c вдоль радиуса полета струй при поливе дождевальной насадкой от диаметра сопла D и давления P

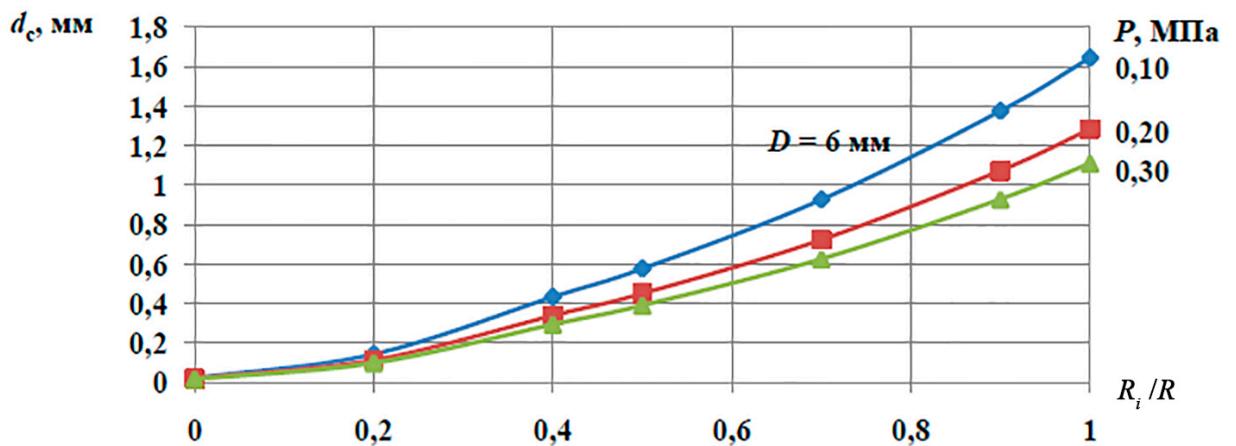
Диаметр сопла D , мм	Давление P , МПа	Средний диаметр капель дождя d_c вдоль радиуса полива, мм						
		0 R_i/R	0,2 R_i/R	0,4 R_i/R	0,5 R_i/R	0,7 R_i/R	0,9 R_i/R	1 R_i/R
2,2	0,10	0,010	0,005	0,085	0,262	0,350	0,565	0,840
2,2	0,20	0,009	0,784	0,067	0,205	0,274	0,441	0,655
2,2	0,30	0,008	0,678	0,058	0,178	0,237	0,381	0,567
4	0,10	0,016	0,118	0,361	0,482	0,775	1,152	1,378
4	0,20	0,014	0,098	0,299	0,399	0,642	0,954	1,141
4	0,30	0,013	0,088	0,268	0,358	0,575	0,854	1,022
5	0,10	0,019	0,131	0,400	0,533	0,857	1,273	1,523
5	0,20	0,016	0,109	0,332	0,442	0,710	1,054	1,261
5	0,30	0,015	0,098	0,297	0,396	0,636	0,944	1,129
6	0,10	0,021	0,143	0,435	0,579	0,930	1,382	1,653
6	0,20	0,018	0,119	0,361	0,480	0,771	1,144	1,368
6	0,30	0,017	0,107	0,323	0,430	0,690	1,025	1,225
8	0,10	0,026	0,165	0,496	0,660	1,059	1,572	1,880
8	0,20	0,023	0,137	0,411	0,547	0,877	1,302	1,556
8	0,30	0,021	0,123	0,369	0,490	0,786	1,166	1,394
10	0,10	0,031	0,184	0,550	0,731	1,171	1,738	2,077
10	0,20	0,027	0,153	0,456	0,606	0,970	1,439	1,720
10	0,30	0,024	0,138	0,409	0,543	0,869	1,289	1,540
12	0,10	0,035	2,308	0,205	0,611	0,812	1,302	1,931
12	0,20	0,0304	1,801	0,163	0,479	0,636	1,017	1,507
12	0,30	0,028	1,557	0,142	0,416	0,551	0,880	1,304



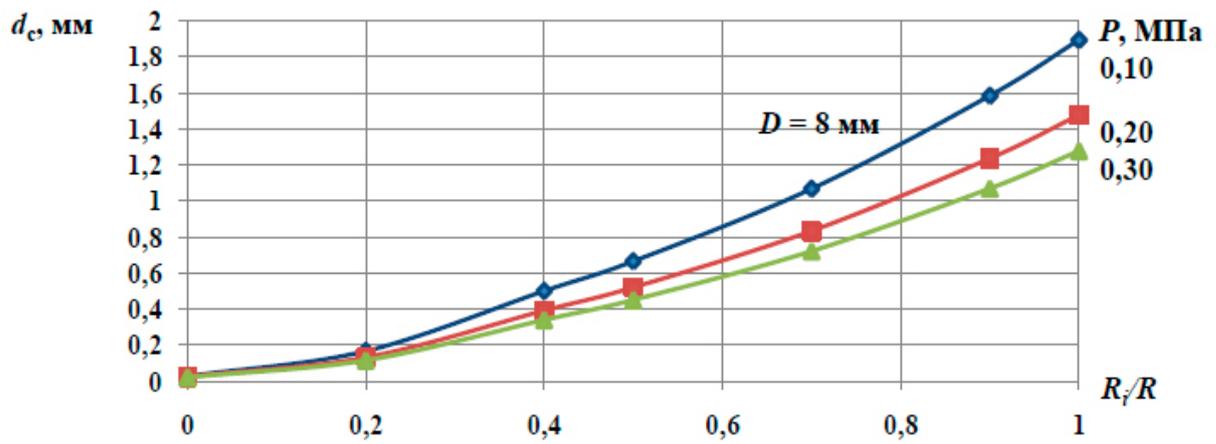
a



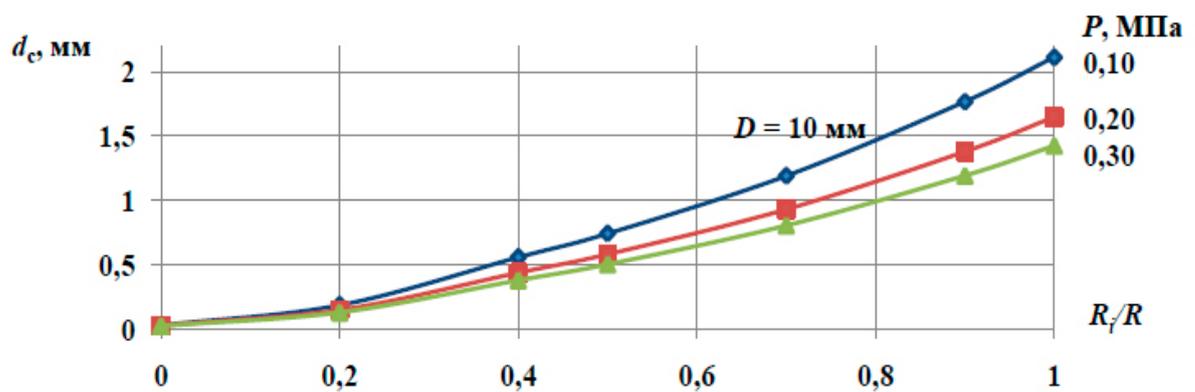
b



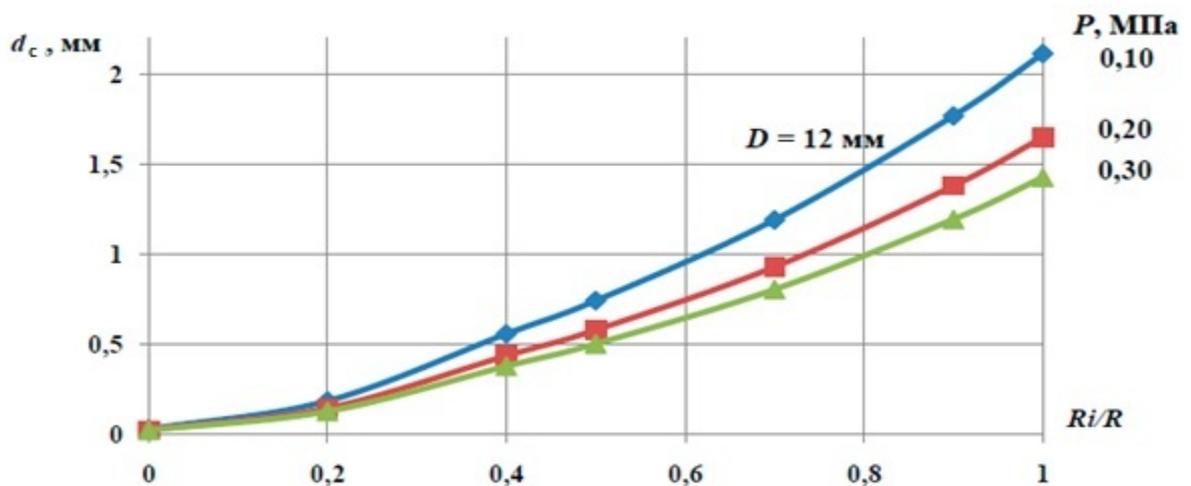
c



z



d



e

Рисунок 4.6 – Зависимость изменения крупности капель дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой от диаметра сопла D и давления P

Исследования показали, что средняя крупность капель дождя дождевальных насадок с обратным конусом повышается относительно радиуса полета капель дождя R_i/R , с увеличением диаметра сопла и уменьшением давления перед насадкой.

Обработка опытных данных (приложение Г) позволила установить, что наименьшая крупность капель дождя в начале радиуса полива дождевальной насадкой (рисунок 4.8, а) определяется в основном диаметром сопла D и давлением P :

$$d_{\min} = 0,01(100P)^{-0,21}D^{0,70}. \quad (4.4)$$

Коэффициент множественной регрессии – 0,803.

Максимальная крупность капель дождя в конце радиуса полива дождевальной насадкой (приложение Д) также зависит от диаметра сопла D и давления P (рисунок 4.8, б):

$$d_{\max} = 1,38(100P)^{-0,27}D^{0,44}. \quad (4.5)$$

Коэффициент множественной регрессии составил 0,809.

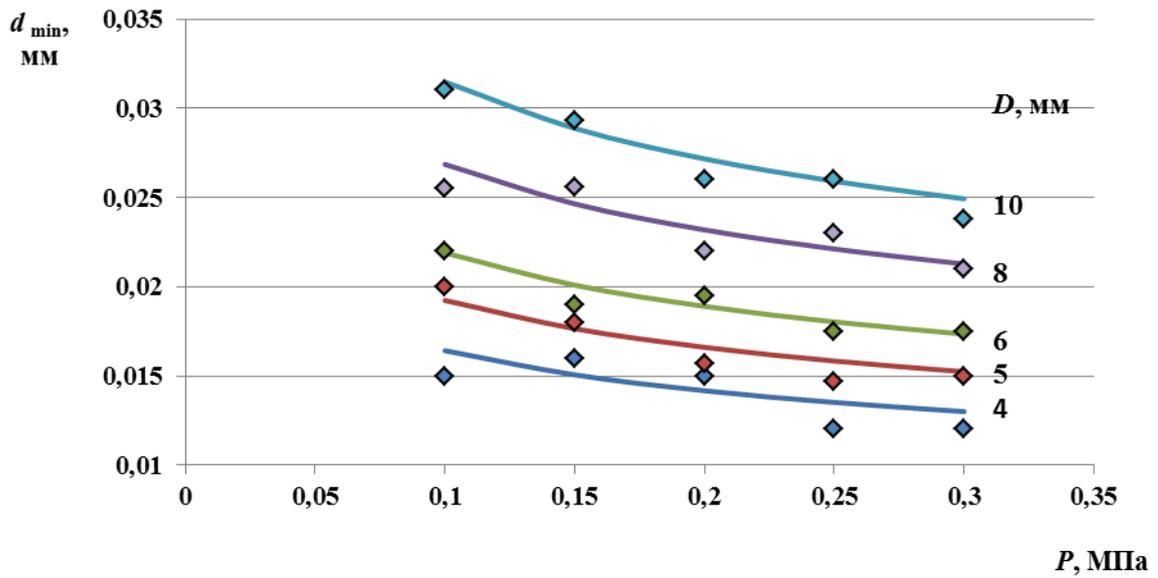
Изменение крупности капель дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой определяли по формуле:

$$d = d_{\min} + (d_{\max} - d_{\min})(X_i/R)e^{-0,75(1-X_i/R)}, \quad (4.6)$$

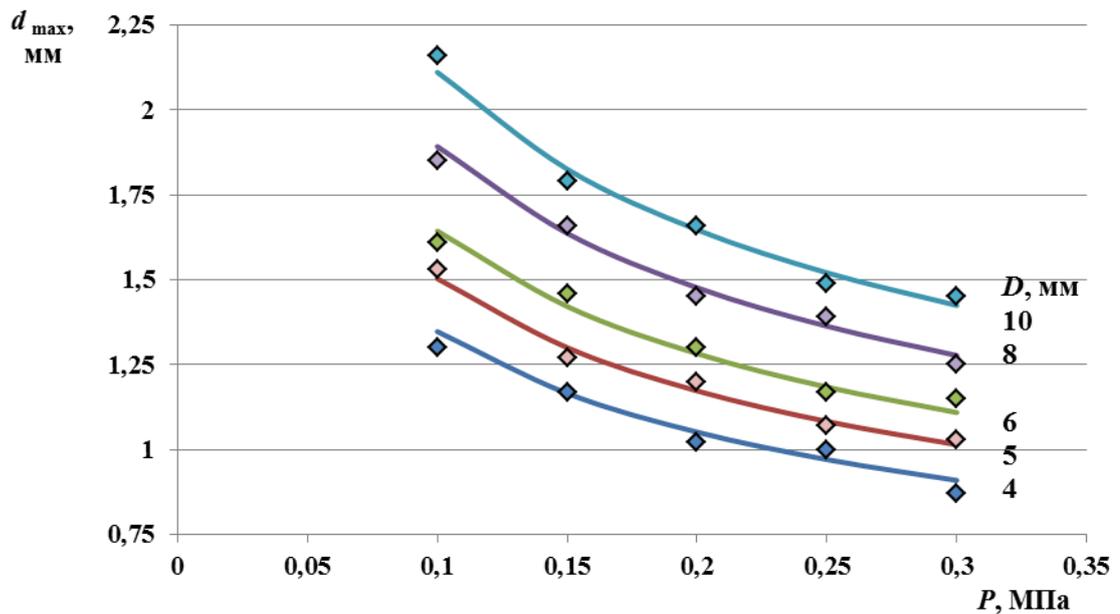
где d_{\min} , d_{\max} – минимальная и максимальная крупность капель дождя вдоль радиуса полива, мм;

X_i/R – относительный радиус полета струи, $0 \leq X_i/R \leq 1$.

Теоретические и экспериментальные значения крупности капель дождя вдоль радиуса полива приведены в таблице 2 приложения Д и на рисунке 4.7, а, б.



a



б

Рисунок 4.7 – Минимальная (*a*) и максимальная (*б*) крупность капель дождя при поливе дождевальными насадками с обратным конусом

Изменение среднего диаметра капель дождя вдоль трубопровода ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-643-90, оборудованной среднеструйными аппаратами и устройствами приповерхностного дождевания, приведено в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Изменение крупности капель дождя вдоль трубопровода ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-463-90 со среднеструйными дождевальными аппаратами и УПД с дождевальными насадками (расстановка через 5–6 м друг от друга)

Номер пролета	Тип дождевателя	Расход воды СДА и УПД с дождевальной насадкой q , л/с	Давление на выходе струи P , МПа	Диаметр основного и дополнительного сопла D, D_d , мм	Радиус полива R , м	Средний диаметр капель дождя d_c , мм
НО-1	СДА	0,116	0,192	2,8	5,6	0,84
	УПД-ДН	0,116	0,167	3,0	3,1	0,51
1–2	СДА	0,192	0,307	3,2	6,33	0,86
	УПД-ДН	0,158	0,168	3,5	3,61	0,50
2–3	СДА	0,480	0,344	4,3–2,4	12,3	0,92
	УПД-ДН	0,291	0,208	4,5	4,6	0,58
6–7	СДА	1,016	0,360	5,6–4,3	15,1	1,07
	УПД-ДН	0,549	0,235	6	5,9	0,60
8–9	СДА	1,790	0,483	7,1–5,6	19,4	1,0
	УПД-ДН	1,024	0,203	8,5	7,11	0,70
11–12	СДА	2,420	0,448	9,5–5,6	23,3	1,24
	УПД-ДН	1,402	0,244	9,5	8,16	0,75
12–13	СДА	2,650	0,437	9,5–5,6	23,1	1,25
	УПД-ДН	1,536	0,238	10	8,36	0,80
13–14	СДА	2,870	0,429	10,3–5,6	24,1	1,32
	УПД-ДН	1,668	0,281	10	8,87	0,82
14–15	СДА	3,090	0,423	10,3–5,6	24,1	1,31
	УПД-ДН	1,802	0,224	11	8,64	0,84
15–16	СДА	3,320	0,421	11,1–5,6	25,3	1,46
	УПД-ДН	1,932	0,182	11	9,1	0,86
Косоль	СДА	3,780	0,420	11,9–5,6	26,2	1,57
	УПД-ДН	1,925	0,300	12	10,2	0,86

Значения медианного диаметра капель при поливе дождевальной насадкой и струйными аппаратами показаны в таблице 4.7 и на рисунке 4.8.

Таблица 4.7 – Зависимость среднего и медианного диаметра капель дождевальной насадки и среднеструйного аппарата от диаметра сопла и давления перед насадкой

Тип дождевателя	Диаметр сопла D , мм	Давление перед насадкой P , МПа	Средний диаметр d_c капель вдоль относительного радиуса полива, мм					Средний диаметр капель d_c , мм	Медианный диаметр капель d , мм
			0,1	0,3	0,5	0,7	0,9		
СДА № 4	9,5	0,43	0,56	0,80	1,16	1,70	2,32	1,4	1,4
СДА № 4	11,9	0,42	0,59	0,86	1,26	1,81	2,58	1,92	1,70
ДН	14,0	0,30	0,18	0,138	0,64	0,98	1,42	0,72	0,72

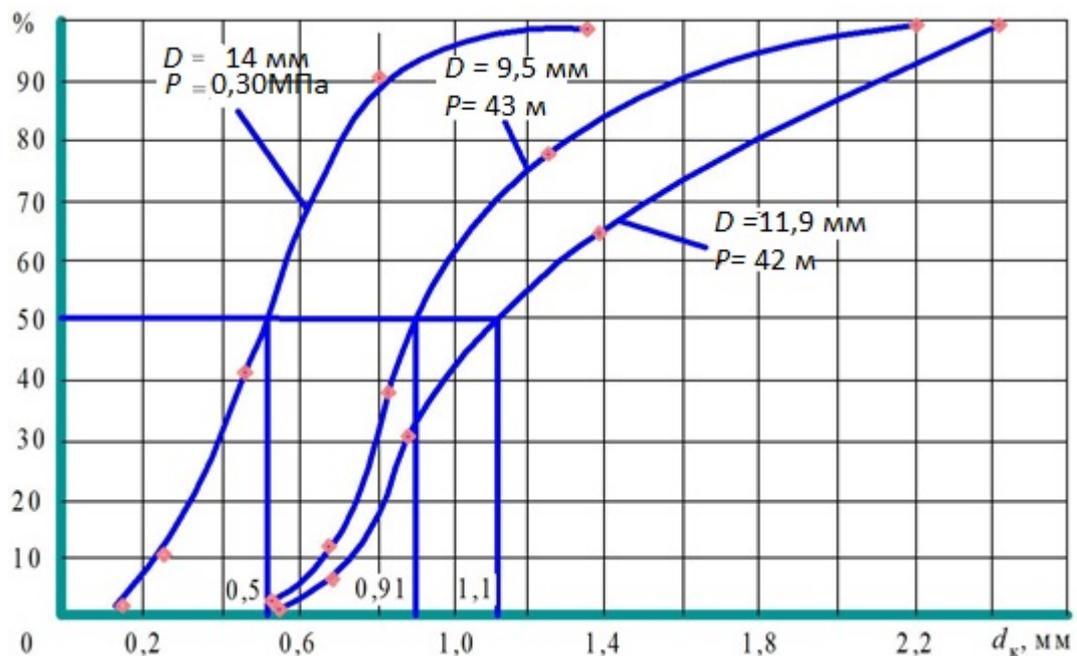


Рисунок 4.8 – Интегральные кривые распределения дождя и величины медианных диаметров капель при поливе дождевальной насадкой (1) и среднеструйными аппаратами (2, 3)

Средний диаметр капель дождевальной насадки при одном и том же расходе воды в 1,8–2,0 раза меньше среднего диаметра капель среднеструйных аппаратов (рисунок 4.9).

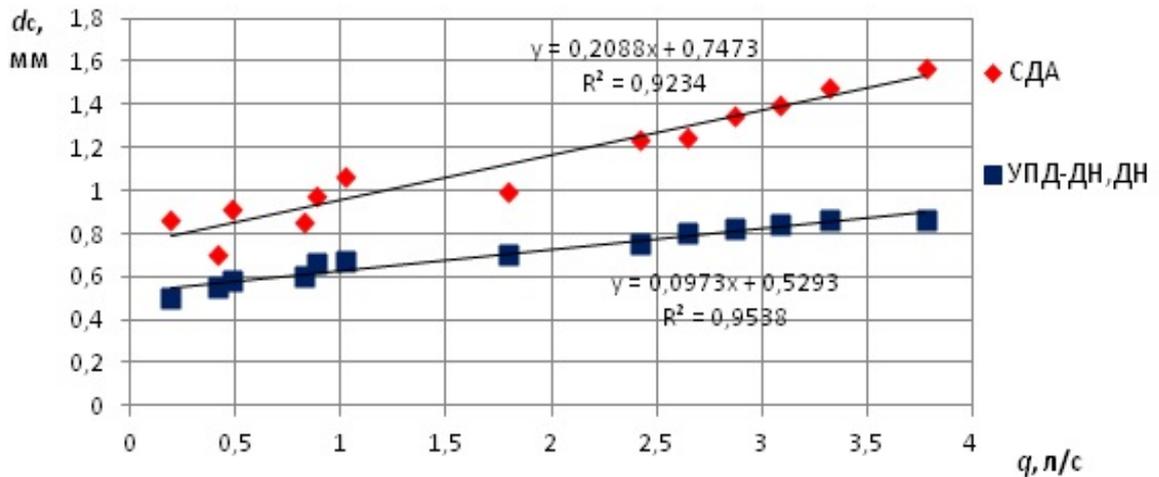


Рисунок 4.9 – Изменение среднего диаметра капель серийных дефлекторных насадок, среднеструйных дождевальных аппаратов и УПД с дождевальными насадками вдоль трубопровода машины «Фрегат» (по данным эксперимента)

Таким образом, исследованиями установлено, что дождевальные насадки с обратным конусом при изменении диаметра сопла от 4 до 10 мм и давления от 0,1 до 0,3 МПа формируют мелкокапельный дождь диаметром 0,5...0,9 мм, что в 1,5–2 раза меньше, чем среднеструйные дождевальные аппараты.

4.6 Эпюры распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой с обратным конусом

Экспериментальные значения распределения нормированного слоя дождя h_i/h_c вдоль радиуса полета струи дождевальной насадки с обратным конусом в зависимости от диаметра сопла и давления перед насадкой приведены в таблице 4.8, приложениях Е, Ж и на рисунке 4.10. При увеличении давления распределение слоя дождя вдоль радиуса полива становится более равномерным (рисунок 4.11).

Таблица 4.8 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой и расчетные значения коэффициентов γ и η бета-распределения

Относительная величина радиуса полива дождевой насадкой X_i/R	Распределение нормированного слоя дождя h_i/h_c							
	$D = 5$ мм		$D = 8$ мм		$D = 10$ мм		$D = 12$ мм	
	$P = 0,01$ МПа	$P = 0,06$ МПа	$P = 0,02$ МПа	$P = 0,16$ МПа	$P = 0,11$ МПа	$P = 0,15$ МПа	$P = 0,13$ МПа	$P = 0,28$ МПа
0	0,0	0,12	0,29	0,600	0,25	0,06	0,20	0,25
0,05	0,09	0,12	0,29	0,606	0,36	0,092	0,28	0,38
0,15	0,19	0,217	0,29	0,498	0,48	0,185	0,30	0,45
0,25	0,38	0,24	0,30	0,606	0,74	0,557	0,68	0,75
0,35	0,39	0,700	0,437	0,876	1,15	0,836	1,10	1,24
0,45	0,575	1,694	0,655	1,347	1,55	1,20	1,60	1,48
0,55	0,959	2,240	1,239	1,617	1,80	1,71	1,94	1,78
0,65	2,01	2,24	1,822	1,886	2,20	2,00	2,33	1,85
0,75	2,687	1,570	2,180	1,480	1,90	2,00	1,90	1,42
0,85	1,919	0,786	1,890	0,808	0,95	1,20	1,20	0,50
0,95	0,72	0,18	0,870	0,269	0,10	0,185	0,20	0,02
γ	3,281	4,039	2,428	1,993	3,71	3,329	3,57	3,36
η	1,565	2,903	1,289	1,738	2,72	2,255	2,41	2,89
X_{50}					0,611		0,645	0,555

Примечание. X_{50} – относительный радиус полива, которому соответствует 50%-й объем вылитой воды и медианный диаметр капель дождя.

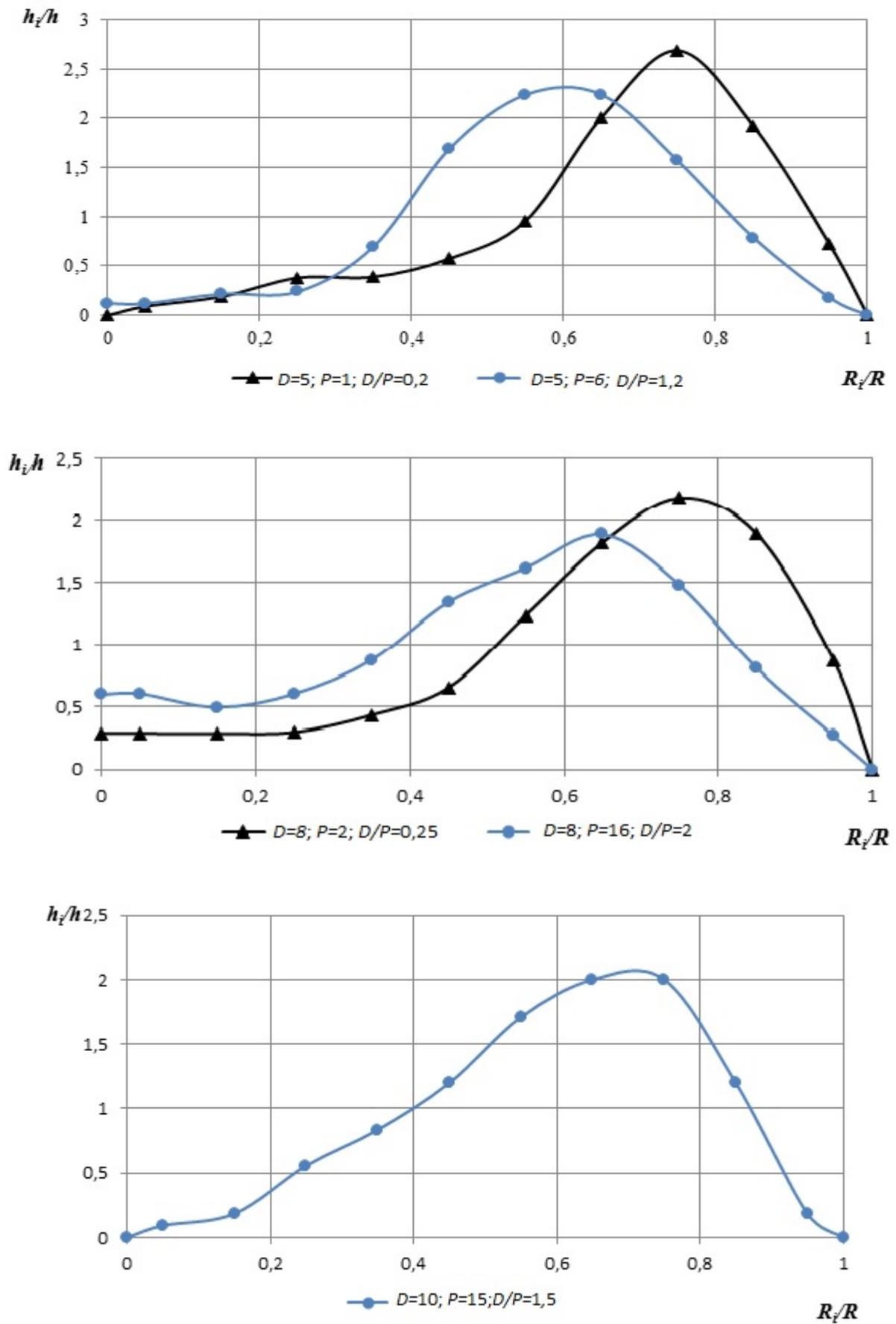


Рисунок 4.10 – Эпюры распределения слоя дождя вдоль радиуса полета струи дождевальной насадки

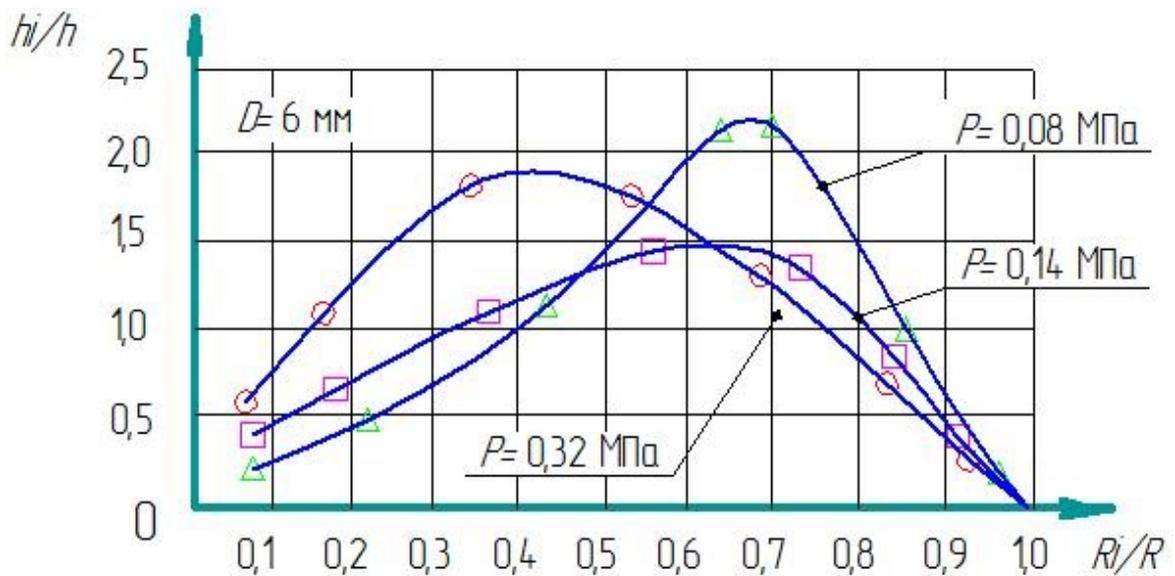


Рисунок 4.11 – Зависимость изменения нормированного слоя дождя вдоль относительного радиуса полета струи дождевальной насадки ($D = 6$ мм) от давления

По нормированным данным таблицы 4.8, приложениям Е, Ж и формулам (3.36), (3.37) рассчитывали коэффициенты γ и η бета-распределения (таблицы 4.8, 4.9, рисунки 4.12, 4.13).

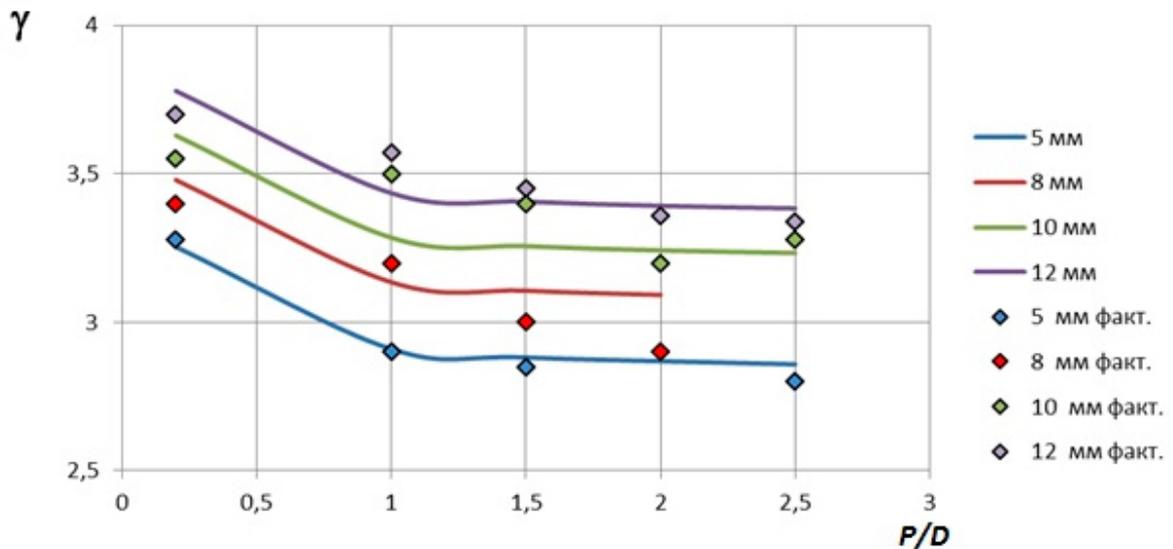


Рисунок 4.12 – Зависимость коэффициента γ бета-распределения от изменения диаметра сопла D и отношения давления на выходе струи к диаметру сопла P/D

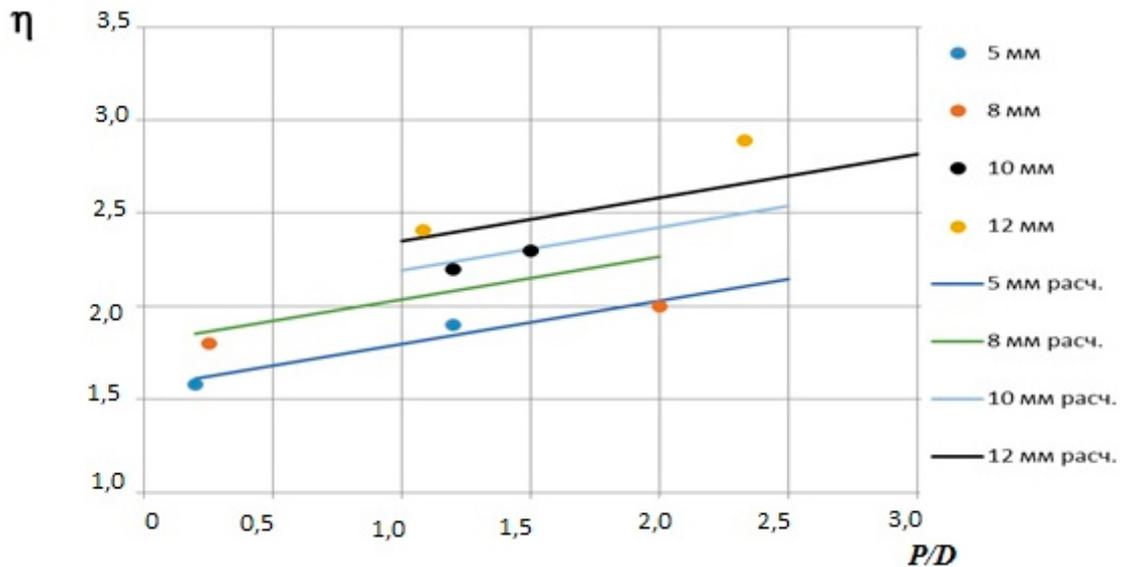


Рисунок 4.13 – Зависимость коэффициента η бета-распределения от изменения диаметра сопла D и отношения давления на выходе струи к диаметру сопла P/D

При небольшом давлении $P = 0,01...0,16$ МПа, соответствующем диаметру сопла $D = 5...16$ мм, и отношении $P/D = 0,005...0,1$ МПа/мм струя незначительно распадается на крупные капли и большая часть дождя распределяется в конце радиуса полива. Коэффициенты γ и η изменяются соответственно от 3,0 до 4,0 и от 1,8 до 2,0.

При среднем давлении $P = 0,06...0,25$ МПа, диаметре сопла $D = 5...16$ мм и отношении $P/D = 0,012...0,015$ МПа/мм распределение слоя дождя вдоль радиуса полива – наиболее равномерное.

При высоком давлении $P = 0,32...0,54$ МПа и отношении $P/D = 0,014...0,023$ МПа/мм струя распадается на мелкие капли и большая часть дождя выпадает в середине и начале струи. Коэффициенты γ и η изменяются соответственно от 2,0 до 2,5 и от 2,5 до 2,7. Математической обработкой опытных данных установлено, что изменение их описывается регрессионной зависимостью:

$$\gamma = 0,706 + 0,075D + 0,086/(P/D); \quad (4.7)$$

$$\eta = 1,173 + 0,079D + 0,231(P/D), \quad (4.8)$$

где P – давление, МПа;

D – диаметр сопла, мм.

Коэффициент множественной регрессии для зависимости (4.7) составляет 0,61, а для зависимости (4.8) – 0,83. Расчеты коэффициентов γ и η приведены в (таблицах 1, 2 приложения Е).

Учитывая параметры эпюры распределения дождя и изменение относительной площади полива, можно рассчитать относительный радиус $(X_i/R)_{50}$, которому соответствует 50%-й объем подаваемой воды и медианный диаметр капель дождя. Расчетные значения относительного радиуса $(X_i/R)_{50}$ приведены в таблице 4.9, приложении Ж, таблица 2 и на рисунке 4.14. При увеличении степени распада струи относительный радиус $(X_i/R)_{50}$ уменьшается от 0,605 до 0,550. Математической обработкой опытных данных (таблица 4.9) установлена зависимость (приложение Ж).

$$(X_i/R)_{50} = 0,49 + 0,1283e^{-0,331(P/D)}. \quad (4.9)$$

Коэффициент множественной регрессии – 0,564.

Таблица 4.9 – Зависимость коэффициентов γ и η бета-распределения и относительного радиуса $(X_i/R)_{50}$ от изменения диаметра сопла и давления перед насадкой

Диаметр сопла D , мм	Давление P , МПа	Отношение P/D , МПа/мм	Коэффициенты		Относительный радиус полива	
			γ	η	расчетный $(X_i/R)_p$	медианный $(X_i/R)_{50}$
6	0,08	0,013	3,2	2,4	0,572	0,605
6	0,14	0,023	3,0	2,53	0,549	0,580
6	0,326	0,054	2,22	2,2	0,511	0,510
8	0,075	0,009	2,5	2,23	0,584	0,60
8	0,195	0,024	3,03	2,89	0,547	0,50
8	0,285	0,036	2,8	2,8	0,529	0,520
10	0,060	0,006	3,58	2,73	0,595	0,60
10	0,12	0,120	3,71	2,72	0,576	0,60
10	0,18	0,180	3,26	2,62	0,560	0,570
12	0,13	0,10	3,57	2,41	0,579	0,60
12	0,28	0,023	3,36	2,89	0,549	0,560
12	0,58	0,048	3,27	2,30	0,516	0,540
14	0,15	0,010	3,6	3,0	0,580	0,580
14	0,30	0,020	3,4	2,4	0,533	0,560
16	0,16	0,010	3,16	2,4	0,583	0,575
16	0,245	0,015	3,24	2,89	0,567	0,550

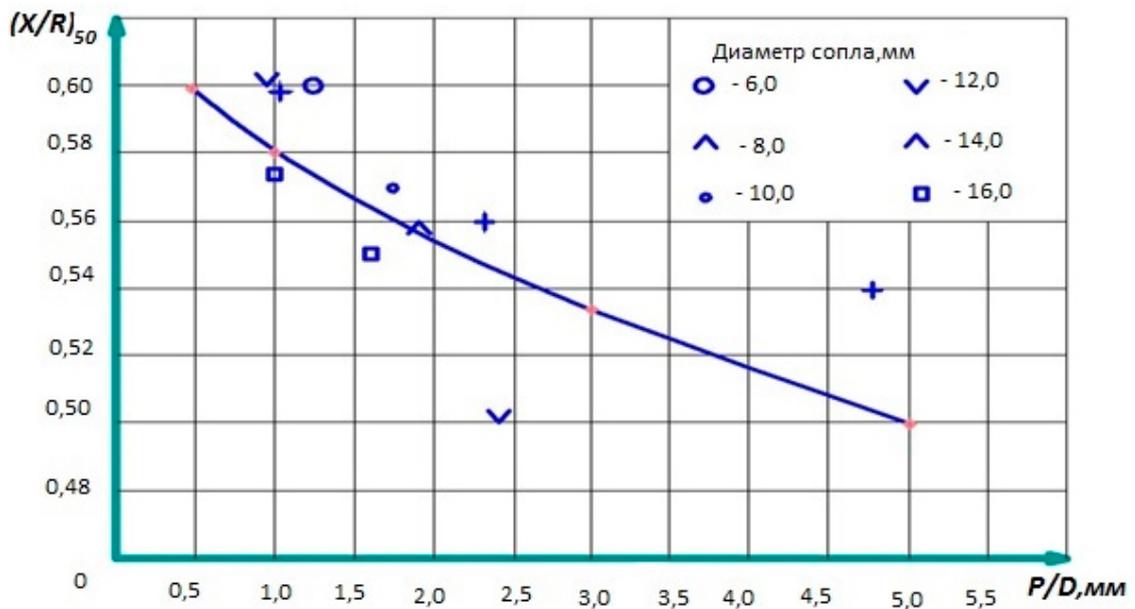


Рисунок 4.14 – Зависимость относительного радиуса полива дождевальной насадкой $(X_i/R)_{50}$, соответствует 50%-й объем подаваемой воды, от отношения давления к диаметру сопла

Таким образом, исследования показали, что для обеспечения наиболее равномерного распределения дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой давление при диаметре сопла $D = 5 \dots 16$ мм должно составлять $P = 0,06 \dots 0,25$ МПа, что соответствует $P/D = 0,012 \dots 0,015$ МПа/мм.

4.7 Карты расстановки устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками на трубопроводах машин «Фрегат» различных модификаций

На основании полученных результатов по определению расхода воды (4.1), потерь давления по длине УПД (4.2), дальности полета струй дождевальных насадок (4.3), а также величин средней и мгновенной интенсивности дождя, среднего диаметра капель дождя, эюр распределения интенсивности дождя (4.4)–(4.6) и коэффициентов равномерности полива. Были рассчитаны карты расстановки дождевальных насадок на 13- и 16-опорных ДМ «Фрегат» (таблицы 1, 2 приложения 3), осуществляющих полив, как при стандартном, так и при низком давлении на входе в машину. При выборе конструктивных и технологических параметров до-

ждевальных насадок была использована методика их расстановки при монтаже на трубопроводе ДМ «Фрегат» на расстоянии 5 и 6 м друг от друга соответственно на 25- и 30-метровых пролетах.

4.8 Выводы

1. Обработкой опытных данных получено, что при увеличении диаметра сопла с 2,2 до 12 мм и давления с 0,1 до 0,3 МПа расход воды насадкой с обратным конусом возрастает с 0,048 до 2,48 л/с, что соответствует расходу воды серийными аппаратами № 1, 2 и 3 ДМ «Фрегат». Среднее значение коэффициента расхода воды дождевальной насадкой с обратным конусом составляет 0,904. Для расчета расхода воды предложена зависимость (4.1).

2. Снижение давления по длине устройства приповерхностного дождевания определяется расходом воды насадкой, диаметром труб и напорного рукава, согласно уравнению (4.2). Для обеспечения небольших потерь давления в трубопроводе при расходе воды дождевальной насадкой от 0,1 до 1,0 л/с УПД должно быть изготовлено из труб с внутренним диаметром 15 мм.

3. Дальность полета струи при поливе дождевальной насадкой изменяется от 3 до 10,5 м. Для ее определения предложена зависимость (4.3), учитывающая диаметр сопла, высоту установки насадки и давление на выходе струи.

Устройства приповерхностного дождевания с насадками следует устанавливать на 25- и 30-метровых пролетах трубопровода машины соответственно через 5 и 6 м друг от друга. Средняя интенсивность дождя при поливе УПД с насадками изменяется от 0,29 (в начале машины) до 1,20 мм/мин (в конце), при поливе серийными аппаратами «Фрегат» – от 0,095 до 0,59.

Мгновенная интенсивность дождя при поливе УПД с насадками составляет 0,28–0,62 мм/мин, что в 2,5–4,2 раза ниже, чем при поливе серийными аппаратами «Фрегат».

4. Крупность капель дождя изменяется вдоль радиуса полета струи дождевальной насадки в зависимости от диаметра сопла и давления. Получены уравне-

ния (4.4), (4.5), (4.6) для расчета максимального и минимального диаметров капель в любой точке радиуса полива. Медианный диаметр капель дождя при поливе дождевальной насадкой с обратным конусом при одинаковом расходе воды в 1,8–2 раза меньше, чем при поливе серийными аппаратами ДМ «Фрегат».

5. Для обеспечения наиболее равномерного распределения слоя дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой при диаметре сопла $D = 5 \dots 16$ мм давление должно составлять $P = 0,06 \dots 0,25$ МПа, что соответствует $P/D = 0,012 \dots 0,015$ МПа/мм. Для математического описания эпюры распределения слоя дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадкой предложено использовать бета-распределение и зависимости (4.7), (4.8) для расчета коэффициентов γ и η и конструктивно-технических параметров насадки. Установлена зависимость (4.9) для распределения относительного радиуса полива, которому соответствует медианный диаметр капель дождя и 50%-й объем воды, подаваемой на площадь полива.

5 РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ ДМ «ФРЕГАТ», ОБОРУДОВАННЫХ УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫМИ УСТРОЙСТВАМИ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО ДОЖДЕВАНИЯ С ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ НАСАДКАМИ

5.1 Расход воды и норма полива ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания

На основании агротехнических исследований устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками был проведен расчет карт расстановки их на трубопроводах ДМ «Фрегат» различных модификаций. Карты настройки 12, 13 и 16-опорных ДМ «Фрегат», работающих как при низком, так и серийном (паспортном) давлении в ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», ООО «Березовское» Энгельсского района, ЗАО «АФ «Волга» Марксовского района и иных хозяйствах, приведены (в таблицах 5.1–5.4 и приложении 3).

Дождевательные насадки устройств приповерхностного дождевания на ДМ «Фрегат» в хозяйстве № 2 ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» были отрегулированы на расход воды 45 л/с при давлении на входе в машину 0,36 МПа. Общий расход воды, подаваемой машиной, замеряли как сумму расходов всеми дождевальными насадками. Замеры показали, что общий расход воды ДМ «Фрегат» с дождевальными насадками при требуемом давлении на входе в машину близок к расчетным значениям (таблицы 5.1, 5.2).

В ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» для подачи воды были использованы насосы 6НДв, СПС-70/80 или СПС-100/100. За поливной сезон давление на входе в ДМ «Фрегат» устанавливали от 0,35 до 0,45 МПа в зависимости от типа работающего насосного агрегата и количества одновременно работающих машин. При этом расход воды изменялся от 35 до 50 л/с. При давлении на входе в машину 0,45 МПа расход воды составлял 49,2 л/с (таблица 5.2, рисунок 5.1).

Таблица 5.1 – Расход воды дождевальными насадками с обратным конусом 12-опорной ДМ «Фрегат» марки ДМ-337-45 при давлении на входе в машину 0,36 МПа (ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»)

Порядковый номер насадки	Строение трубопровода	Расстояние от неподвижной опоры, м	Расход воды дождевателя, л/с	Диаметр сопла насадки, мм	Диаметр переходника, мм	Давление в трубопроводе, МПа	Давление на выходе струи, МПа
1	А	20	0,137 (1)	3,0	4,3	0,36	0,23
2, 3, 4, 5, 6	Г	50	0,144 (5)	3,0	4,5	0,36	0,25
7, 8, 9, 10, 11	ЖК	75	0,214 (5)	4,0	4,6	0,35	0,18
12, 13, 14, 15, 16	Г	105	0,370 (5)	5,0	6,2	0,345	0,22
17, 18, 19, 20, 21	ЖК	130	0,403 (5)	5,0	6,9	0,34	0,26
22, 23, 24, 25, 26	ЖК	155	0,489 (5)	6,0	6,6	0,33	0,186
27, 28, 29, 30, 31	ЖК	180	0,575 (5)	6,5	7,1	0,32	0,187
32, 33, 34, 35, 36	ЖК	205	0,661 (5)	7,0	7,5	0,32	0,184
37, 38, 39, 40, 41	Г	235	0,906 (5)	8,0	8,8	0,31	0,204
42, 43, 44, 45, 46	ЖД	265	1,03 (5)	8,5	9,2	0,31	0,203
47, 48, 49, 50, 51	Г	295	1,15 (5)	9,0	9,7	0,3	0,201
52, 53, 54, 55, 56	ЖД	325	1,277 (5)	9,5	10,0	0,3	0,202
57, 58, 59	КК	337	0,913 (3)	7,2	–	0,3	0,3
Концевой дождевальный аппарат (КДА)	–	362	6,0 (1)	14,3–8,7–6,3	–	0,3	0,3
Общий расход воды ДМ «Фрегат» – 45 л/с.							

Таблица 5.2 – Расход воды дождевальными насадками с обратным конусом 12-опорной ДМ «Фрегат» марки ДМ-337-45 при давлении на входе в машину 0,45 МПа (ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»)

Порядковый номер насадки	Строение трубопровода	Диаметр сопла насадки, мм	Диаметр переходника, мм	Давление в трубопроводе, МПа	Давление на выходе струи из сопла, МПа	Расход воды дождевателя (шт.) л/с
1	А	3,0	4,3	0,45	0,283	0,152 (1)
2, 3, 4, 5, 6	Г	3,0	4,5	0,44	0,301	0,157 (5)
7, 8, 9, 10,11	ЖК	4,0	4,6	0,43	0,208	0,232 (5)
12, 13, 14, 15, 16	Г	5,0	6,2	0,42	0,247	0,392 (5)
17, 18, 19, 20, 21	ЖК	5,0	6,9	0,41	0,307	0,441 (5)
22, 23, 24, 25, 26	ЖК	6,0	6,6	0,40	0,217	0,533 (5)
27, 28, 29, 30, 31	ЖК	6,5	7,1	0,40	0,222	0,632 (5)
32, 33, 34, 35, 36	ЖК	7,0	7,5	0,39	0,217	0,725 (5)
37, 38, 39, 40, 41	Г	8,0	8,8	0,39	0,242	1,00 (5)
42, 43, 44, 45, 46	ЖД	8,5	9,2	0,39	0,241	1,128 (5)
47, 48, 49, 50, 51	Г	9,0	9,7	0,38	0,241	1,263 (5)
52, 53, 54, 55, 56	ЖД	9,5	10,0	0,38	0,238	1,4 (5)
57, 58, 59	КК	7,2	–	0,38	0,38	1,01 (3)
КДА	–	14,3–8,7–6,3	–	0,38	0,38	6,5 (1)
Общий расход воды ДМ «Фрегат» – 49,2 л/с.						

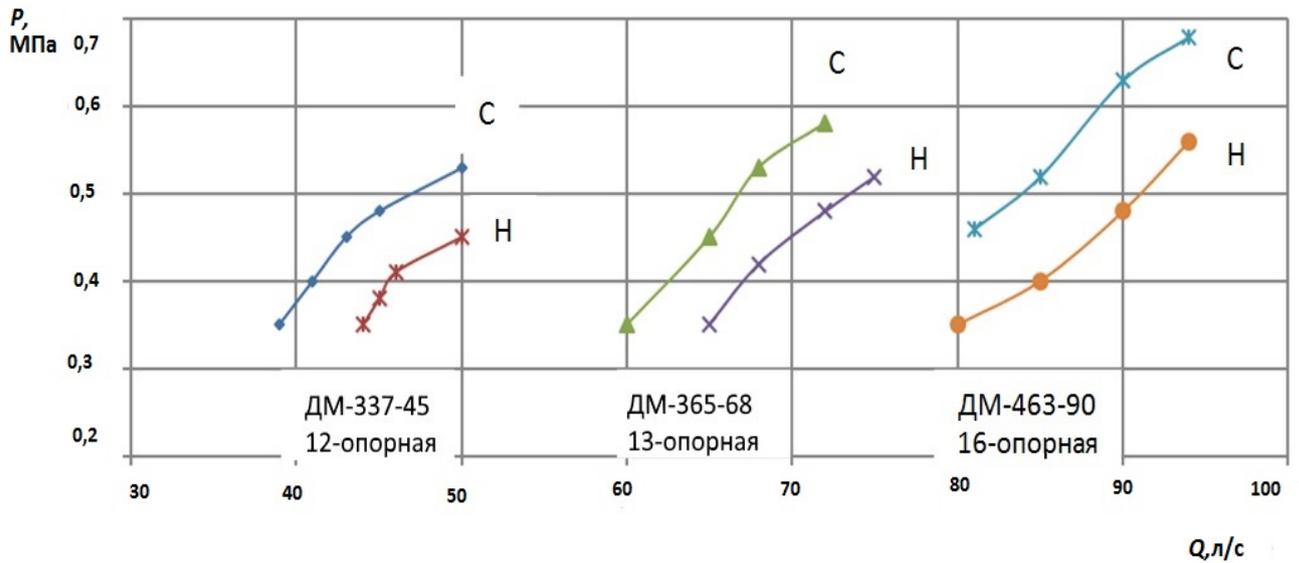


Рисунок 5.1 – Зависимость расхода воды серийной (С) и низконапорной (Н) ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания от давления на входе в машину

Дождевальные насадки устройств приповерхностного дождевания на 13-опорной ДМ «Фрегат» в хозяйствах № 22, 23 и 10 (ЗАО «АФ «Волга» Марковского района) были настроены на расход воды 68 л/с, при давлении на входе в машину 0,53 МПа (таблица 5.3, рисунок 5.1). При давлении 0,45 МПа расход воды снижался до 64 л/с.

Исследования показали, что расход воды 16-опорной ДМ «Фрегат» модификации ДМУ-Б-463-90, оборудованной УПД (хозяйство № 8 в ООО «Березовское» Энгельсского района), при давлении 0,6 МПа составил 90 л/с (таблица 5.4, рисунок 5.1). При снижении давления до 0,55 МПа расход воды уменьшился до 85 л/с.

Различные типы дождевателей дождевальные насадки, смонтированные на УПД, и серийные дефлекторные насадки, установленные на трубопроводе низконапорной ДМ «Фрегат», обеспечивали общий расход воды 45 л/с при давлении на входе 0,36 МПа (таблица 5.1). За время эксплуатации 12-опорной ДМ «Фрегат» в хозяйстве № 2 с насосом бНДв давление на входе в машину изменялось от 0,35 до 0,39 МПа в зависимости от величины открытия задвижки, а общий расход воды колебался от 43 до 46 л/с (рисунок 5.1).

Таблица 5.3 – Расход воды дождевальными насадками с обратным конусом 13-опорной ДМ «Фрегат» марки ДМ-365-68 при давлении на входе в машину 0,53 МПа (ЗАО «АФ «Волга»)

Порядковый номер насадки	Диаметр насадки, мм	Диаметр переходника, мм	Давление в трубопроводе, МПа	Давление на выходе струи, МПа	Расход воды насадкой, л/с
1	3,0	3,6	0,53	0,24	0,140
2, 3, 4, 5, 6	3,0	3,7	0,52	0,243	0,141
7, 8, 9, 10, 11	4,0	4,5	0,51	0,238	0,248
12, 13, 14, 15, 16	5,0	4,9	0,50	0,194	0,350
17, 18, 19, 20, 21	5,5	5,8	0,49	0,232	0,462
21, 22, 23, 24, 25	6,0	6,5	0,48	0,248	0,570
26, 27, 28, 29, 30	6,5	7,1	0,47	0,257	0,680
31, 32, 33, 34, 35	8,0	7,7	0,46	0,219	0,952
35, 36, 37, 38, 39	8,5	8,4	0,45	0,233	1,108
40, 41, 42, 43, 44	9,0	9,0	0,44	0,241	1,264
45, 46, 47, 48, 49	9,5	9,7	0,43	0,251	1,436
50, 51, 52, 53, 54	10,0	10,0	0,42	0,245	1,574
55, 56, 57, 58, 59	10,0	11,2	0,42	0,296	1,728
60, 61, 62, 63	11, 11, 11, 8	11, 11, 11, 8	0,42	0,24, 0,24, 0,24, 0,21	1,9, 1,9, 1,9, 0,94
КДА	14,3–7,9– –6,3	–	0,42	0,42	6,6
Общий расход воды ДМ «Фрегат» – 68 л/с.					

Таблица 5.4 – Расход воды дождевальными насадками с обратным конусом 16-опорной ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-463-90 при давлении на входе в машину 0,6 МПа (хозяйство № 8 ООО «Березовское»)

Порядковый номер насадки	Диаметр насадки, мм	Диаметр переходника, мм	Давление в трубопроводе, МПа	Давление на выходе струи, МПа	Расход воды насадкой, л/с
1	3,0	3,4	0,594	0,236	0,139
2, 3, 4, 5, 6	3,5	3,0	0,582	0,140	0,146
7, 8, 9, 10, 11	4,0	4,8	0,565	0,286	0,272
12, 13, 14, 15, 16	5,0	5,3	0,550	0,250	0,3976
17, 18, 19, 20, 21	6,0	5,6	0,536	0,295	0,5232
21, 22, 23, 24, 25	6,5	6,5	0,522	0,233	0,6488
26, 27, 28, 29, 30	7,0	7,1	0,509	0,247	0,7744
31, 32, 33, 34, 35	8,0	7,0	0,497	0,196	0,90
35, 36, 37, 38, 39	8,5	7,5	0,486	0,199	1,025
40, 41, 42, 43, 44	9,0	8,0	0,477	0,200	1,151
45, 46, 47, 48, 49	9,0	9,0	0,469	0,246	1,276
50, 51, 52, 53, 54	9,5	9,2	0,453	0,239	1,402
55, 56, 57, 58, 59	9,5	10,3	0,440	0,284	1,528
60, 61, 62, 63, 64	10,0	10,5	0,431	0,271	1,653
65, 66, 67, 68, 69	10,0	11,5	0,425	0,314	1,779
70, 71, 72, 73, 74	11,0	11,1	0,421	0,245	1,904
75, 76, 77, 78	10, 10, 10, 8	11, 11, 11, 8	0,420	0,24, 0,24, 0,24, 0,21	1,68, 1,68, 1,68, 0,94
КДА	15,9–9,5– –7,9	–	0,420	0,42	8,74
Общий расход воды ДМ «Фрегат» – 90 л/с.					

Таким образом, ДМ «Фрегат», оборудованные УПД с дождевальными насадками, работающие как при стандартном, так и при низком давлении, обеспечивают заданный расход воды в соответствии с их модификацией при поддержании требуемого давления на входе в машину.

5.2 Потери воды на испарение и унос ветром при поливе ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания

Результаты экспериментальных исследований, выполненных в ОПХ «ВолжНИИГиМ», ЗАО «АФ «Волга», показали, что нормы полива низконапорными ДМ «Фрегат», оборудованными УПД с дождевальными насадками, в весенний и осенний периоды при небольшой температуре воздуха и слабом ветре соответствуют нормативным значениям (таблица 5.5).

Расстановкой мерных емкостей на поле устанавливали фактическую норму полива машиной «Фрегат». После замеров давления на выходе струи из сопла дождевальной насадки и скорости движения машины определяли расход воды на участках замеров и по зависимости (3.18) вычисляли потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у.}$

На оросительных системах ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ», ЗАО «АФ «Волга» и др. было проведено четыре опыта. Замеряли фактические нормы полива среднеструйными дождевальными аппаратами, серийными дефлекторными насадками, смонтированными на трубопроводе ДМ «Фрегат», и дождевальными насадками, установленными на УПД, а также потери воды на испарение и унос ветром при различных погодных условиях.

При выполнении опыта № 1 в хозяйстве № 2 ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» была произведена точная настройка 12-опорной ДМ «Фрегат» марки ДМУ-А-328-45 на норму полива, которая при цикличности гидропривода последней тележки 3,0 ход/мин составила 317 м³/га, что только на 1,5 % меньше требуемой 322 м³/га.

Данный опыт проводили при температуре воздуха – 18 °С, относительной влажности воздуха – 65 %, скорости ветра на высоте 2 м от поверхности почвы – 0,5 м/с, коэффициенте напряженности метеорологических факторов Φ по В.С. Хабарову – 8,4. Наибольшие потери воды $E_{и.у.}$ при поливе среднеструйными дождевальными аппаратами составили 5,2–5,4 %, серийными дефлекторными насадками

ми, смонтированными на трубопроводе машины, – 3,3–3,5 %, дождевальными насадками, установленными на УПД, – 1,9–2,1 % (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Расход воды различными дождевателями 12-опорных ДМ «Фрегат» марки ДМУ-А-328-45 при $P_{вх} = 0,4$ МПа, $m_p = 32,2$ мм, $n = 3,0$ ход/мин (ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»)

Тип дождевателя	Диаметр сопла насадки, мм	Расход воды дождевателем, л/с	Средний расход воды на пролете, л/с	Фактическая норма полива, мм	Потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у}$, %
ДН	2,2	0,152 (1)	0,152	–	–
ДН	3,0	0,157 (5)	0,785	–	–
УПД-ДН	4,0	0,232 (5)	1,160	31,53	2,1
УПД-ДН	5,0	0,392 (5)	1,960	31,11	3,5
СДА	4,8–3,2	0,441 (5)	2,205	30,55	5,4
ДН	6,0	0,533 (5)	2,665	–	–
УПД-ДН	6,0	0,632 (5)	3,160	31,56	2,0
ДН	7,0	0,725 (5)	3,625	31,14	3,4
СДА	6,3–4,8	1,00(5)	5,00	30,57	5,3
УПД-ДН	8,0	1,128 (5)	5,64	31,6	1,9
ДН	9,0	1,263 (5)	6,314	31,17	3,3
СДА	7,1–4,8	1,4(5)	7,00	30,6	5,2
ДН	10, 8,0	1,01 (3)	3,03	–	–
КДА	14,3–8,7–6,3	6,5 (1)	6,5	–	–
				$m_c = 31,7$	
Общий расход воды машиной ДМ «Фрегат» – 49,7 л/с.					

Опыт № 2 выполняли при следующих климатических условиях: температуре воздуха – 24°C , относительной влажности воздуха – 39 %, скорости ветра на высоте 2 м от поверхности почвы – 1 м/с, коэффициенте напряженности метеорологических факторов Φ по В.С. Хабарову – 29,2. Потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у}$ в зоне полива среднеструйными дождевальными аппаратами составили 12 %, серийными дефлекторными насадками – 8–8,1 %, дожде-

вальными насадками, установленными на устройства приповерхностного дождевания, – 4,6–4,7 % (таблица 5.6, рисунок 5.2).

Таблица 5.6 – Карта расстановки дождевальных насадок на УПД и серийных дефлекторных насадок на трубопроводе 12-опорной ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-328-45 ($P_{вх} = 0,4$ МПа, $m_c = 37,0$ мм)

Тип дождевателя	Номер тележки	Диаметр сопла насадки D , мм	Расход воды на пролете $q_{пр}$, л/с	Фактическая норма полива m_f , мм	Расчетная норма полива m_p , мм	Потери воды на испарение и унос ветром $E_{н.у}$, %
	4					
СДА		4,8–3,2	2,26	30,44	34,13	12,1
		4,8–3,2				
		4,8–3,2				
		4,8–3,2				
	5					
ДН		6	3,48	31,60	34,17	8,1
		6				
		6				
		6				
	6					
УПД-ДН		6	3,34	34,00	35,36	4,0
		6				
		6				
		6				
	7					
СДА		6,3–4,3	4,06	33,40	37,41	12,0
		6,3–4,3				
		6,3–4,3				
		6,3–4,3				
	8					
ДН		7,7	3,84	28,99	31,31	8,0
		7,7				
		7,7				
		7,7				
	9					
УПД-ДН		8	5,0	34,96	36,57	4,6
		8				
		8				
		8				
	10					

Опыт № 3 проводили при температуре воздуха – 23⁰С, относительной влажности воздуха – 43 %, скорости ветра на высоте 2 м от поверхности почвы – 3,7 м/с, коэффициенте напряженности метеорологических факторов Φ – 62,9. Наибольшие потери воды $E_{и.у}$ 24,2–24,3 и 16–16,1% были зафиксированы на участках полива соответственно среднеструйными дождевальными аппаратами и серийными дефлекторными насадками, смонтированными на трубопроводе машины, при поливе дождевальными насадками, установленными на УПД, они оказались в 1,7 раза меньше – 9,3–9,4 % (таблица 5.7, рисунок 5.2).

Таблица 5.7 – Карта расстановки дождевальных насадок на УПД и серийных дефлекторных насадок на трубопроводе ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-328-45 ($n = 2,6$ ход/мин, $P_{вх} = 0,4$ МПа; $m_c = 37,0$ мм, $v_B = 3,7$ м/с, $\Phi = 62,9$)

Тип дождевателя	Номер тележки	Диаметр сопла насадки D , мм	Расход воды на пролете $q_{пр}$, л/с	Фактическая норма полива $m_{ф}$, мм	Расчетная норма полива m_p , мм	Потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у}$, %
	4					
СДА		4,8–3,2	2,26	27,45	34,13	24,3
		4,8–3,2				
		4,8–3,2				
		4,8–3,2				
	5					
ДН		6	3,48	31,60	34,17	16,1
		6				
		6				
		6				
	6					
УПД-ДН		6	3,34	32,32	35,36	9,4
		6				
		6				
		6				
	7					
СДА		6,3–4,3	4,06	30,12	37,41	24,2
		6,3–4,3				
		6,3–4,3				
		6,3–4,3				
	8					
ДН		7,7	3,84	28,99	31,31	16,0
		7,7				

Продолжение таблицы 5.7

		7,7				
		7,7				
	9					
УПД-ДН		8	5,0	33,45	36,57	9,3
		8				
		8				
		8				
	10					

Метеорологические условия при выполнении опыта № 4 были наиболее жесткие. Так, скорость ветра увеличилась до 6,5 м/с, температура воздуха составила 22⁰С, относительная влажность воздуха – 40 %, коэффициент напряженности метеорологических факторов Φ – 99.

Потери воды $E_{и.у}$ в зоне полива среднеструйными дождевальными аппаратами составили 30–31 %, серийными дефлекторными насадками, смонтированными на трубопроводе машины, – 20,5–21,1 %, дождевальными насадками, установленными на УПД, – 12,2–12,3 % (таблица 5.8, рисунок 5.2).

Таблица 5.8 – Карта расстановки дождевальных насадок на УПД и серийных дефлекторных насадок на трубопроводе ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-328-45 ($n = 2,6$ ход/мин, $P_{вх} = 0,4$ МПа, $m_c = 37,0$ мм)

Тип дождевателя	Номер тележки	Диаметр сопла насадки D , мм	Расход воды на пролете $q_{пр}$, л/с	Фактическая норма полива m_f , мм	Расчетная норма полива m_p , мм	Потери воды на испарение и унос ветром $E_{и.у}$, %
	4					
СДА		4,8–3,2	2,26	26,0	34,13	31,1
		4,8–3,2				
		4,8–3,2				
		4,8–3,2				
	5					
ДН		6	3,48	28,21	34,17	21,1
		6				
		6				
		6				
	6					
УПД-ДН		6	3,34	31,48	35,36	12,3
		6				

Продолжение таблицы 5.8

		6				
		6				
	7					
СДА		6,3–4,3	4,06	28,77	37,41	30,0
		6,3–4,3				
		6,3–4,3				
		6,3–4,3				
	8					
ДН		7,7	3,84	25,98	31,31	20,5
		7,7				
		7,7				
		7,7				
	9					
УПД-ДН		8	5,0	32,59	36,57	12,2
		8				
		8				
		8				
	10					

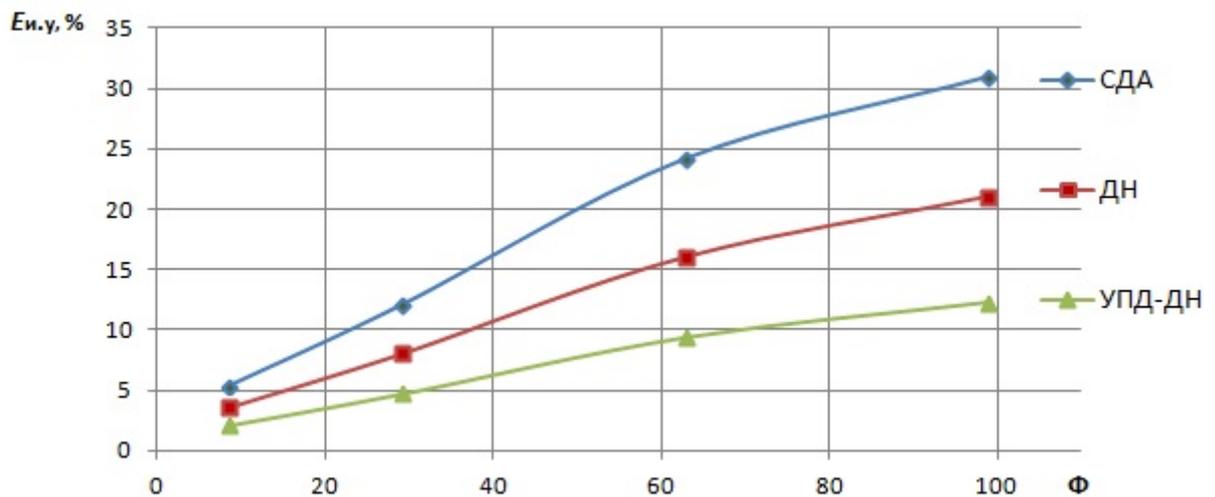


Рисунок 5.2 – Экспериментальные значения испарение и уноса ветром $E_{и.у}$ при поливе ДМ «Фрегат» среднеструйными дождевальными аппаратами, серийными дефлекторными насадками и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальной насадкой от показателя напряженности метеорологических факторов Φ

Потери воды $E_{и.у}$ вдоль радиуса полива ДМ «Фрегат» с серийными дождевальными аппаратами и УПД с насадками при значении коэффициента напряженности метеорологических факторов $\Phi = 34,5$ (средняя величина для Саратовской области) приведены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Потери воды на испарение и унос ветром при поливе ДМ «Фрегат» с серийными дождевальными СДА аппаратами и УПД- ДН с дождевальными насадками

Расход воды дождевателем q , л/с	Диаметр основного и дополнительного сопла D , D_d , мм	Давление на выходе струи из сопла P , МПа	Угол наклона струи к горизонту θ , град	Средневзвешенная высота подъема струи h_c , м	Средний диаметр капли дождя d_c , мм	Средняя и мгновенная интенсивность дождя, мм/мин		Потери воды на испарение и унос ветром, %	
						ρ_c	ρ_m	$E_{и.у}$	$E^*_{и.у}$
0,192	3,2 СДА	0,307	27	4,1	0,86	0,091	1,545	37,2	21,4
	4,0 УПД-ДН	0,157	20	1,1	1,25	0,072	1,893	21,4	14,3
0,415	3,6-2,4 СДА	0,432	27-27	5,6	0,70	0,112	1,525	35,7	21,4
	6,0 УПД-ДН	0,144	20	1,2	0,675	0,216	0,240	23,6	14,1
0,480	4,3-2,4 СДА	0,344	27-27	5,5	0,92	0,117	1,618	29,5	17,7
	6,0 УПД-ДН	0,193	20	1,2	1,02	0,114	1,897	23,3	12,0
0,825	5,1-3,2 СДА	0,455	27-27	6,4	0,85	0,166	1,948	29,8	17,8
	8,0 УПД-ДН	0,181	20	1,3	1,05	0,191	1,811	23,2	10,9
0,883	5,6-3,2 СДА	0,392	27-27	6,2	0,98	0,171	2,091	26,5	15,9
	8,0 УПД-ДН	0,207	20	1,3	1,22	0,204	2,072	19,9	9,0
1,016	4,3-5,6 СДА	0,360	27-27	6,2	1,07	0,202	1,808	24,6	14,7
	10,0 УПД-ДН	0,112	20	1,3	1,08	0,202	1,809	22,8	8,5
1,790	5,6-7,1 СДА	0,483	27-27	7,4	1,0	0,276	1,921	25,3	15,1
	12 УПД-ДН	0,168	20	1,4	0,864	0,565	0,378	17,1	8,2
2,42	5,6-9,5 СДА	0,448	27-27	7,7	1,24	0,311	2,050	21,8	13,1
	14,0 УПД-ДН	0,166	20	1,5	1,05	0,311	1,570	22,0	7,7
2,650	9,6-5,6 СДА	0,437	27-27	7,7	1,25	0,344	2,175	21,1	12,6
	14,0 УПД-ДН	0,200	20	1,5	1,1	0,344	1,60	22,0	7,5
3,780	11,9-5,6 СДА	0,420	27-27	8,0	1,57	0,433	2,60	17,3	10,4
	16,0 УПД-ДН	0,237	20	1,6	0,866	0,874	0,429	15,6	6,3

Примечание. $E_{и.у}$, $E^*_{и.у}$ – потери воды на испарение и унос ветром при температуре воздуха 17,4 °С, относительной влажности воздуха 59 %, скорости ветра 3,7 м/с, угле между направлением ветра и трубопроводом машины соответственно 90 и 45 град.

Проведенные исследования показали, что ДМ «Фрегат» с дождевальными насадками, установленными на УПД, обеспечивают снижение высоты подъема дождевого облака, при этом потери воды $E_{и.у}$ в абсолютных значениях снижаются на 3,2–11 % (в среднем на 7,1%), или в относительных величинах – в 1,5–2 раза. При поливной норме 400 м³/га в зоне полива дождевальными насадками, установленными на УПД, прибавка объема воды на почве может достигать 15...45 м³/га по сравнению с участками полива серийными дефлекторными насадками, смонтированными на трубопроводе машины.

5.3 Равномерность полива ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания

Равномерность распределения слоя дождя на поле при поливе ДМ «Фрегат» зависит от многих факторов. Одними из них являются: направление и скорость ветра и его изменчивость, отношение радиуса захвата струи к расстоянию между СДА, серийными дефлекторными насадками, или УПД с дождевальными насадками, которое характеризуется степенью перекрытия струй R/ℓ .

К другим факторам относятся: степень распыления струй, которая определяется средним диаметром капель и отношением давления к диаметру струи; равномерность полива СДА, серийными дефлекторными насадками и УПД с дождевальными насадками; норма полива машиной; высота подъема струй над поверхностью поля и угол наклона их к горизонту; величина ввода рассекателя в струю; соответствие расхода воды СДА или серийной дефлекторной насадкой, или УПД с дождевальной насадкой теоретическому значению, отказы СДА или серийных дефлекторных насадок, или УПД с дождевальными насадками и их засоряемость; потери воды на испарение и унос ветром при поливе СДА или серийными дефлекторными насадками, или УПД с дождевальными насадками; порыв трубопровода; отсутствие сливной системы в гидроприводе; протечки в кранах; колебание давления в трубопроводе машины; рельеф поля и его уклон; вид сельскохозяйственной культуры и пр.

Для определения равномерности полива ДМ «Фрегат», оборудованной УПД с дождевальными насадками, установленными через 5 и 6 м друг от друга, были проведены полевые опыты при изменении скорости ветра и его направления и различных нормах полива (таблицы 5.10–5.15, рисунки 5.3–5.9). По результатам исследований определили коэффициент эффективности полива, значения которого сопоставили с данными, полученными при поливе СДА и серийными дефлекторными насадками, установленными в стандартные штуцера трубопровода машины.

Во время первого опыта (от 15.07.15), определяли следующие параметры:

1. Давление на входе в машину (изменялось от 0,4 до 0,42 МПа).
2. Цикличность гидропривода последней тележки: время одного цикла $t_{ц} = 40$ с, цикличность $n = 60/t_{ц} = 60/40 = 1,5$ ход/мин. Расчетная норма полива – $638 \text{ м}^3/\text{га}$.

Теоретическая скорость последней тележки составила:

$$v_{т} = \ell \cdot 1,5 = 0,246 \text{ м/мин},$$

где ℓ – путь, пройденный тележкой за один ход гидроцилиндра в минуту, $\ell = 0,164$ м.

3. Фактическая скорость движения последней тележки машины (определяли в трехкратной повторности по времени прохождения 10 м пути). Среднее время составило 40 мин, что соответствует фактической средней скорости тележки:

$$v_{ф} = 10/40 = 0,245 \text{ м/мин}.$$

Теоретическая и фактическая скорости тележки имеют близкие значения.

Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода ДМ «Фрегат» приведено в таблице 5.10 и на рисунке 5.3.

Обработка результатов опыта № 1 показала, что равномерность полива при скорости ветра 3...5 м/с достаточно высокая, коэффициент эффективности полива составил 0,671 (таблица 5.11, рисунки 5.3 и 5.4). Такое значение коэффициента эффективности полива при скорости ветра 3,2 м/с (порывы до 5 м/с) и при перпендикулярном направлении к трубопроводу ДМ «Фрегат» можно считать при-

емлемым, т.к. $K_{эф.п}$ при поливе машиной со среднеструйными дождевальными аппаратами обычно ниже – 0,55–0,60 (рисунок 5.10).

Таблица 5.10 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода низконапорной ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания (опыт № 1, $v_T = 0,246$ м/мин, $P_{вх} = 0,4...0,42$ МПа)

Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (1 ряд)	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (2 ряд)	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (3 ряд)
50	2	1310	2	1310	2	1000
58		1280		1300		1080
62		1200		1080		1220
66		1520		1730		1800
70		2480		2100		2200
74	3	2230	3	1590	3	1230
78		2200		2150		1930
82		1540		1990		2250
86		1530		1500		1540
90		1840		2000		2800
94		2170		2230		1700
98		1470		1380		1350
102	4	1420	4	1470		1420
106		1770		2020	4	1930
110		1300		1290		1440
114		1300		1380		1250
118		1350		1440		1650
122		1150		1310		1210
126		1460		1380	5	1460
130	5	1000	5	1010		1410
134		1710		2010		2320
138		2150		2080		1660
142		2100		2010		1160
146		1090		900		1100
150		1900		1740		1790
154	6	2150	6	1380	6	2260
158		1150		1400		1410
162		1400		1420		1190
166		1550		1420		1700
170		1780		1520		1430
174		1480		1380		1550
178		1440				
182	7	1850	7	1820	7	1840

Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (1ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (2 ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (3 ряд)мл
186		1520		1370		1320
190		1740		1760		1860
194		1130		1000		1170
198		1550		1550		1260
202		700		530		800
206	8	1250	8	710	8	870
210		780		1130		1210
214		1460		1830		2020
218		1210		850		1300
222		1450		1460		1630
226		1510		1130		1600
230		1480		1440		1530
234		1350	9	1130	9	1210
238	9	1710		1250		1190
242		1230		1360		1400
246		1270		1150		1280
250		1570		1340		1480
254		1580		1510		1640
258		1420		1100		1400
262		1490		1220		
266	10	950	10	880	10	1080
270		1100		890		1080
274		1200		1040		1240
278		1300		1130		1320
282		1530		1720		1590
286		1810		1310		1710
290		1080		1190		1430
294	11	1180	11	1030	11	1150
298		1010		940		1080
302		1020		1070		1180
306		960		910		960
310		1320		1140		1210
314		1130		1250		1330
318		1050				
322	12	950	12	820	12	950
326		1000		1130		1300
330		1330		850		1000
334		1300		1350		1570
338	Консоль	600		980		1100
Средние значения		1505,506		1448,636		1421,494

Во втором опыте(16.07.15 г.) время одного цикла гидроцилиндра последней тележки машины – 14,8 с, цикличность $n = 60:14,8 = 4,05$ ход/мин. Расчетная норма полива – $220 \text{ м}^3/\text{га}$, средняя скорость ветра – 4,8 м/с.

Значения объемов воды в мерных емкостях приведены в таблице 5.12 и на рисунке 5.5. Суммарный расход воды машиной (при увеличении цикличности гидроцилиндра с 1,5 до 4 ход/мин и расхода воды на гидропривод с 1,1 до 2,9 л/с) составил 50,3 л/с, т.е. был близок расчетному.

Таблица 5.11 – Распределение объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» в хозяйстве № 2 ОПХ «ВолжНИИГиМ» (1, 2 и 3-й ряды мерных емкостей без концевых аппаратов и подлива из гидроцилиндров, опыт № 1)

Номер интервала	Интервал между объемами воды в мерных емкостях, мл	Число случаев	Характеристики распределения объемов воды
1	530–725	4	$V_{\min} = 530 \text{ мл}$
2	725–920	10	$V_{\max} = 2480 \text{ мл}$
3	920–1115	33	$V_c = 1435 \text{ мл}$
4	1115–1310	48	$0,75V_c = 1076,2 \text{ мл}$
5	1310–1505	52	$1,25V_c = 1793,7 \text{ мл}$
6	1505–1700	24	$K_{\text{эф.п}} = 0,671$
7	1700–1895	24	$K_{\text{н.п}} = 0,126$
8	1895–2090	12	$K_{\text{из.п}} = 0,204$
9	2090–2285	15	
10	2285–2480	5	

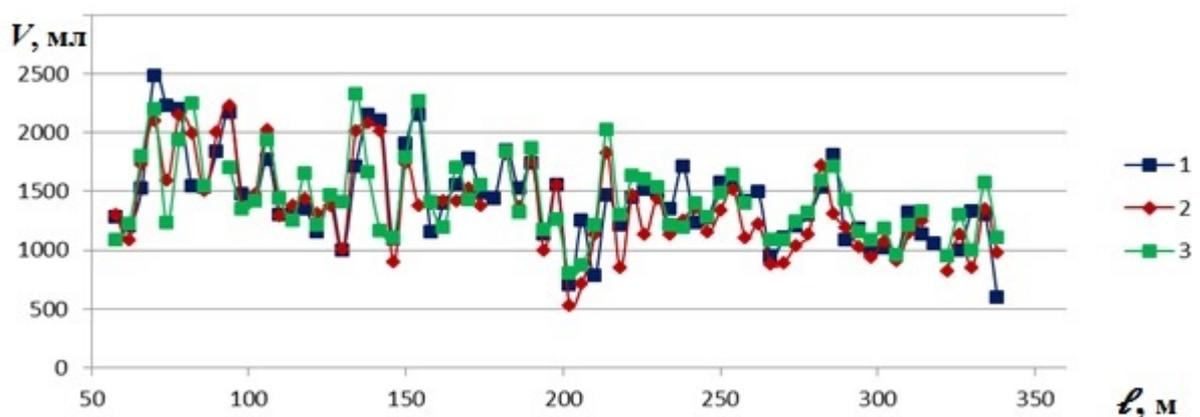


Рисунок 5.3 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода ДМ «Фрегат»: 1, 2 и 3-й ряды емкостей без концевых аппаратов и подлива из гидроцилиндров

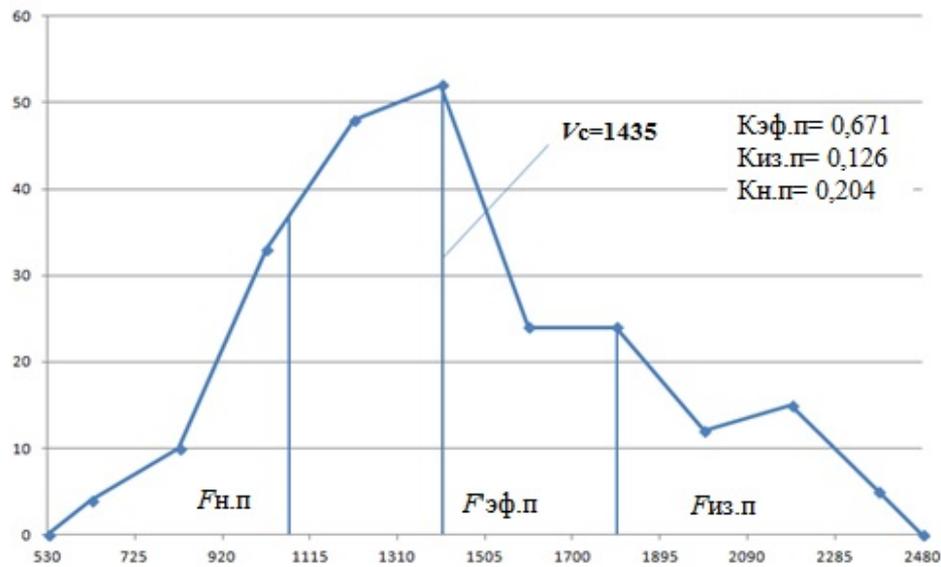


Рисунок 5.4 – Частотный график изменения объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» (хозяйство № 2 в ОПХ «ВолжНИИГиМ»)

Таблица 5.12 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода низконапорной ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания (опыт № 2, $v_T = 0,66$ м/мин, $P_{вх} = 0,4$ МПа)

Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (1ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (2 ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (3 ряд)мл
14		510		940		250
18	1	300	1	270	1	150
22		270		220		150
26		670		650		350
30		650		650		480
34		670		660		600
38		460		550		500
42		400		420		450
46		360		450	2	470
50	2	440	2	480		500
54		500		570		540
58		470		530		610
62		190		220		250
66		310		310		360
70		370		440	3	580
74	3	670	3	710		850
78		740		610		570
82		500		400		600

Продолжение таблицы 5.12

Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (1 ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (2 ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (3 ряд)мл
86		350		350		390
90		650		600		700
94		560		590		610
98		590		770		560
102	4		4		4	
106		380		720		470
110		520		460		510
114		420		350		380
118		440		400		450
122		390		350		370
126	5	480	5	440	5	560
150		400	6	370		530
154	6	120		500	6	530
158		440		460		460
162		550		440		500
166		340		320		320
170		460		370		420
174		540		530		560
178	7	870	7	770	7	540
182		650		640		590
186		380		380		410
190		420		550		500
194		380		420		440
198		440	8	500		450
202	8		8		8	
206		450		430		580
210		280		280		300
214		530		500		530
218		370		420		450
222		490		490		420
226		520		460		460
230		570	9	450	9	530
234	9	600		590		470
238		450		520		420
242		570		500		610
246		410		380		430
250		570		450		690
254		410		500		510
258		420		450		430
262	10	580	10	610	10	550

Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (1ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (2 ряд) мл	Номер тележки	Объем воды в мерной емкости (3 ряд)мл
266		520		530		600
270		290		280		320
274		450		570		400
278		480		530		530
282		370		360		400
286		490		450		370
290	11	580	11	570	11	850
294		420		330		530
298		320		310		300
302		410		400		340
306		340		330		430
310		390		290		320
314		550	12	440	12	500
318	12	430		340		320
322		370		300		310
326		210		160		240
330		370		300		360
334		460		320		320
Средние		454,7674		457,5581		454,0698
286		490		450		370

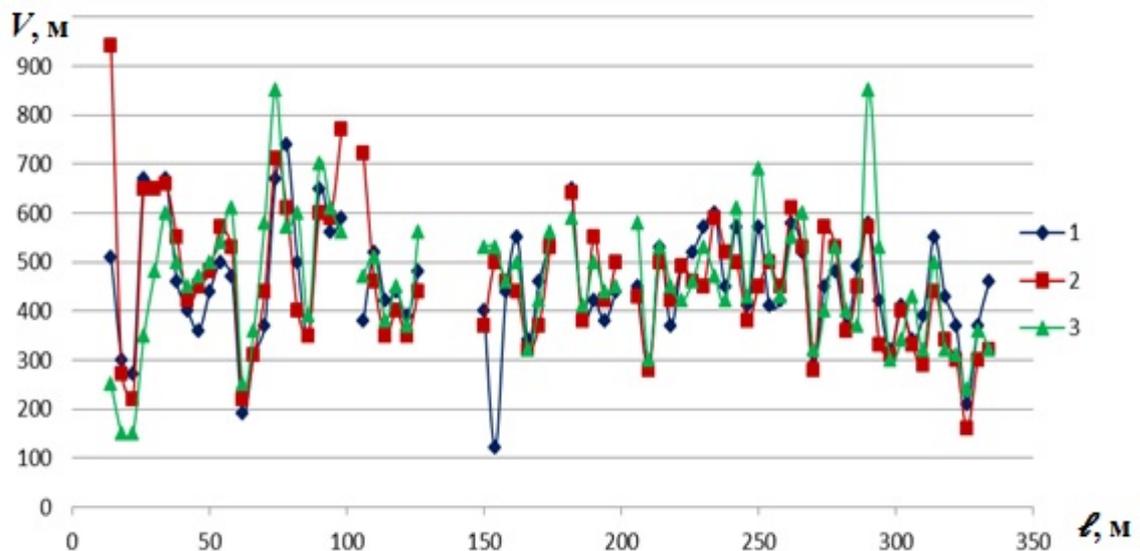


Рисунок 5.5 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода ДМ «Фрегат» (1, 2, 3-й ряды мерных емкостей)

Обработкой данных опыта № 2 установлено, что коэффициент эффективности полива при скорости ветра 4,8 м/с (порывы до 5 м/с) составил 0,62 (таблица 5.13, рисунок 5.6). Это значение при перпендикулярном направлении ветра к трубопроводу машины можно считать приемлемым, т.к. $K_{эф.п}$ при поливе машиной с СДА обычно ниже – 0,45–0,50 (рисунок 5.10).

Таблица 5.13 – Число случаев распределения объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» (хозяйство № 2 в ОПХ «ВолжНИИГиМ»)

Номер интервала	Интервал между объемами воды в мерных емкостях, мл	Число случаев	Характеристики распределения
1	120–202	5	$V_{\min} = 120$ мл
2	202–284	11	$V_{\max} = 940$ мл
3	284–364	36	$V_c = 464$ мл
4	364–448	56	$0,75 V_c = 348$ мл
5	448–530	57	$1,25 V_c = 580$ мл
6	530–612	43	$K_{эф.п} = 0,62$
7	612–694	13	$K_{н.п.} = 0,172$
8	694–776	6	$K_{из.п.} = 0,207$
9	776–858	2	
10	858–940	2	

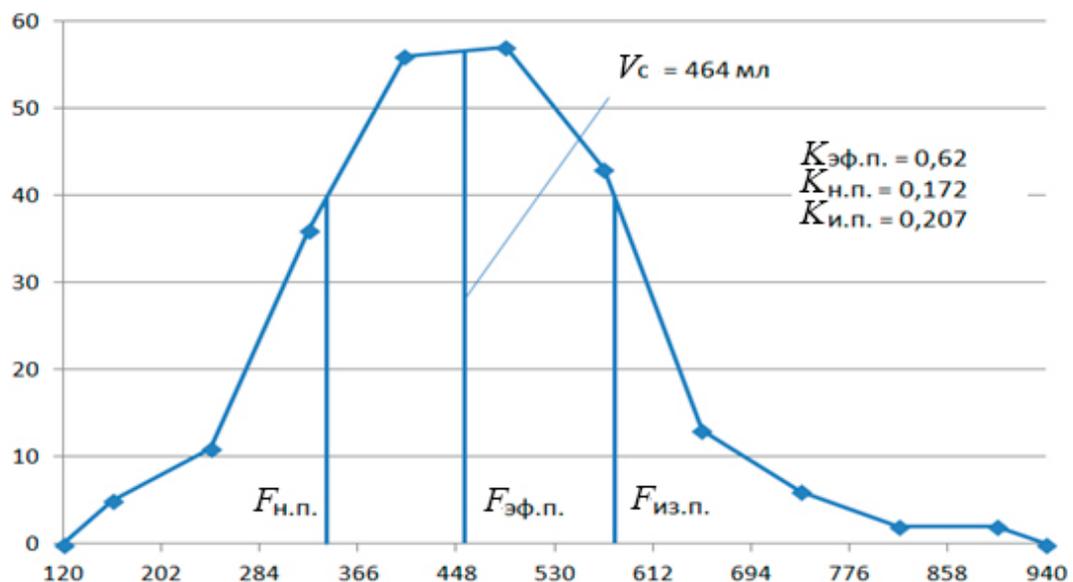


Рисунок 5.6 – Частотный график изменения объемов воды после полива ДМ «Фрегат» (хозяйство № 2 в ОПХ «ВолжНИИГиМ»)

В третьем опыте время одного цикла гидроцилиндра последней тележки машины – 23 с, цикличность – $60:23 = 2,6$ ход/мин, расчетная норма полива – $348 \text{ м}^3/\text{га}$ (таблица 5.14).

Таблица 5.14 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода низконапорной ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания (опыт № 3, $v_t = 0,426 \text{ м/мин}$, $P_{\text{вх}} = 0,4 \text{ МПа}$)

Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объемы воды в мерных емкостях, мл	Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объемы воды в мерных емкостях, мл	Расстояние от неподвижной опоры, м	Номер тележки	Объемы воды в мерных емкостях, мл
	1 ряд		118		700	230		800
6			122		500	234	9	830
10			126		660	238		580
14		700	130	5	730	242		760
18	1	440	134		560	246		610
22		180	138		940	250		540
26		980	142		330	254		800
30		610	146		280	258		650
34		700	150		620	262	10	650
38		500	154	6	620	266		670
42		450	158		650	270		390
46		410	162		730	274		660
50	2	520	166		520	278		700
54			170		710			
58		320	174		770	282		540
62		620	178	7		286		640
66		430	182			290	11	840
70		750	186		600	294		530
74	3		190		760	298		460
78			194		640	302		550
82		730	198		620	306		580
86		600	202	8		310		420
90		770	206		450			
94		880				314		730
98		810	210		470	318	12	500
102	4		214		790	322		650
106		700	218		630	326		400
110		690	222		620	330		650
114		480	226		610	334		450
						338		450

Суммарный расход воды машиной (при увеличении цикличности гидроцилиндра с 1,5 до 2,6 ход/мин и повышении расхода воды на гидропривод с 1,1 до 1,9 л/с) составил 49,3 л/с, т.е. был близок расчетному.

Обработка результатов опыта № 3 показала, что равномерность полива при скорости ветра 3,7 м/с – высокая, коэффициент эффективности полива составил 0,707 (таблица 5.15, рисунки 5.7 и 5.8).

Таблица 5.15 – Число случаев распределения объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» (хозяйство № 2 в ОПХ «ВолжНИИГиМ»)

Номер интервала	Интервал между объемами воды в мерных емкостях, мл	Число случаев	Характеристики распределения объемов ВОДЫ
1	390–434	3	$V_{\min} = 390$ мл
2	434–478	5	$V_{\max} = 830$ мл
3	478–522	2	$V_c = 610$ мл
4	522–566	4	$0,75 V_c = 457,5$ мл
5	566–610	5	$1,25 V_c = 762,5$ мл
6	610–654	10	$K_{\text{эф.п}} = 0,707$
7	654–698	3	$K_{\text{н.п}} = 0,172$
8	698–742	3	$K_{\text{из.п}} = 0,121$
9	742–786	4	
10	786–830	4	

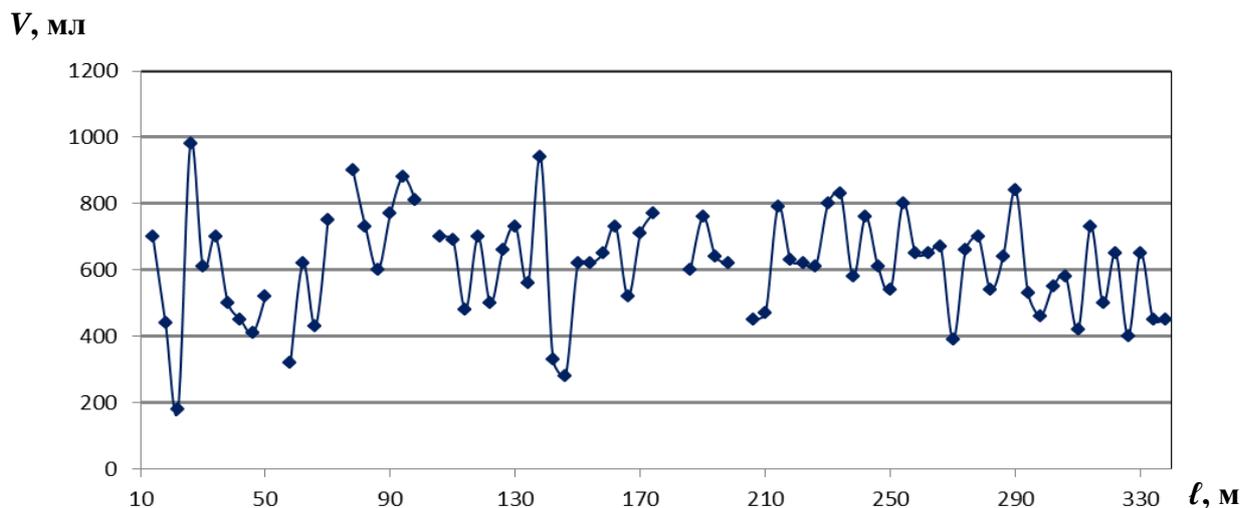


Рисунок 5.7 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода ДМ «Фрегат» (1-й ряд дождемеров)

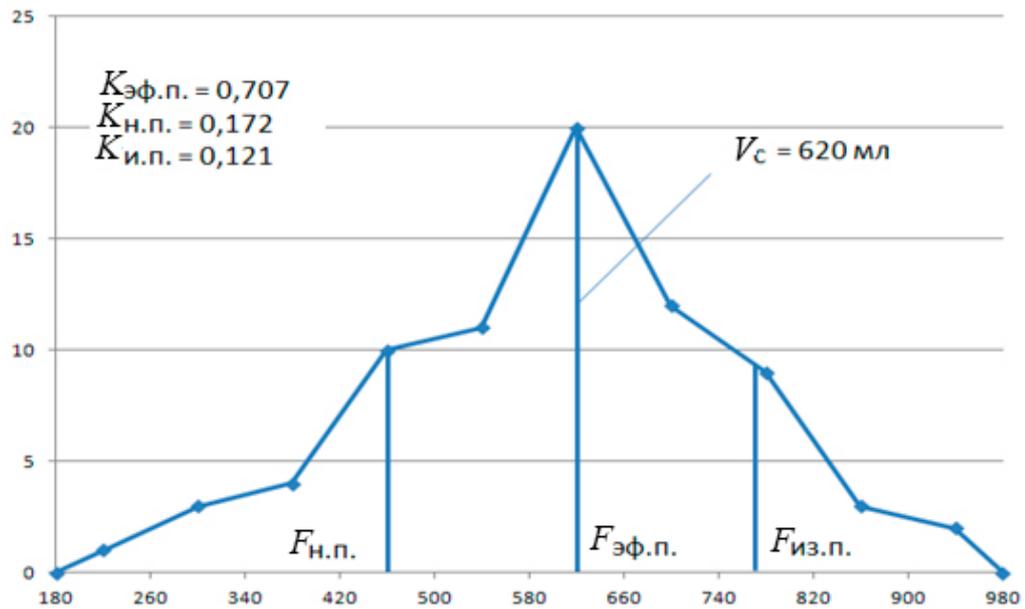


Рисунок 5.8 – Частотный график изменения объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» (хозяйство № 2 в ОПХ «ВолжНИИГиМ»)

Результаты исследований УПД с дождевальными насадками в ЗАО «АФ «Волга» приведены в таблицах 5.16, 5.17 и на рисунке 5.9.

Таблица 5.16 – Распределение объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» в хозяйстве № 22 ЗАО «АФ «Волга» (схема расстановки УПД с насадками через 5 и 6 м друг от друга; цикличность гидроцилиндра – 3,75 ход/мин; расчетная норма полива – $438,5 \text{ м}^3/\text{га}$; $K_{эф.п.} = 0,70$; $K_{н.п.} = 0,16$; $K_{из.п.} = 0,14$)

Расстояние от неподвижной опоры, м	Объемы воды в мерных емкостях, мл	Расстояние от неподвижной опоры, м	Объемы воды в мерных емкостях, мл	Расстояние от неподвижной опоры, м	Объемы воды в мерных емкостях, мл
0	380	52	520	104	360
2	550	54	390	106	470
4	530	56	560	108	540
6	270	58	390	110	390
8	230	60	480	112	560
10	210	62	510	114	440
12	350	64	350	116	410
14	490	66	470	118	530
16	430	68	440	120	440
18	400	70	430	122	390

Продолжение таблицы 5.16

Расстояние от неподвижной опоры, м	Объемы воды в мерных емкостях, мл	Расстояние от неподвижной опоры, м	Объемы воды в мерных емкостях, мл	Расстояние от неподвижной опоры, м	Объемы воды в мерных емкостях, мл
20	480	72	540	124	600
22	550	74	300	126	510
24	310	76	400	128	310
26	400	78	570	130	560
28	280	80	370	132	370
30	430	82	450	134	490
32	360	84	350	136	350
34	280	86	320	138	420
36	380	88	450	140	460
38	410	90	370	142	490
40	510	92	620	144	610
42	300	94	310	146	600
44	350	96	270	148	650
46	360	98	450	150	570
48	440	100	430	152	460
50	360	102	380	154	380

Таблица 5.17 – Число случаев распределения объемов воды в мерных емкостях после полива ДМ «Фрегат» (хозяйство № 22 в ЗАО «АФ «Волга»)

Номер интервала	Интервал между объемами воды в мерных емкостях, мл	Число случаев	Характеристики распределения объемов воды
1	185–212	4	$V_{\min} = 185$ мл
2	213–240	8	$V_{\max} = 464$ мл
3	241–268	7	$V_c = 308$ мл
4	269–296	12	$K_{\text{эф.п}} = 0,701$
5	297–324	6	$K_{\text{н.п}} = 0,136$
6	325–352	8	$K_{\text{из.п}} = 0,161$
7	353–380	8	
8	381–408	7	
9	409–436	3	
10	437–464	1	

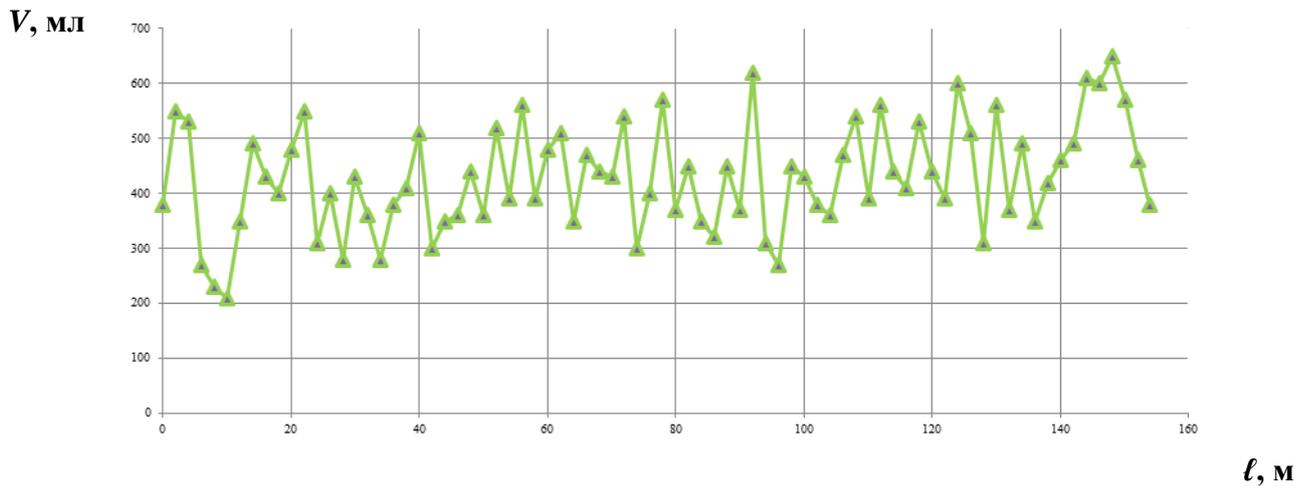


Рисунок 5.9 – Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль машины «Фрегат» (хозяйство № 22 в ЗАО « АФ «Волга»)

Дождевые струи при установке насадок на УПД на высоте 0,6 м от поверхности земли поднимаются на 1,5...3,5 м, что значительно ниже, чем у среднеструйных дождевальных аппаратов. Это повышает устойчивость дождевальных струй к ветру и способствует улучшению равномерности полива.

Исследования показали, что ДМ «Фрегат», оборудованные УПД с дождевальными насадками, обеспечивают высокую равномерность полива. Коэффициент эффективности полива при небольшом ветре (1,2...1,8 м/с) составляет 0,87...0,85. При средней скорости ветра 3,9...4,9 м/с, что свойственно для Саратовской области, он также остается высоким 0,4...0,7 (таблица 5.18, рисунок 5.10).

Таблица 5.18 – Зависимость равномерности полива ДМ «Фрегат», оборудованных среднеструйными дождевальными аппаратами, серийными дефлекторными насадками и УПД с дождевальными насадками, от скорости ветра

Тип дождевателя	Скорость ветра, м/с	Коэффициент эффективности полива
СДА	0,0	0,87
	1,0	0,81
	1,3	0,80
	1,7	0,78
	2,0	0,79
	2,0	0,83
	2,5	0,78
	2,9	0,73
	3,8	0,59
	5,0	0,49

Тип дождевателя	Скорость ветра, м/с	Коэффициент эффективности полива
УПД-ДН	1,2	0,87
	1,8	0,85
	2,7	0,82
	3,9	0,74
	4,9	0,70
ДН	1,0	0,72
	2,0	0,67
	3,0	0,59
	4,0	0,46
	5,0	0,31

Равномерность полива ДМ «Фрегат» с серийными дефлекторными насадками, установленными в стандартные штуцера, – невысокая (таблица 5.18, рисунок 5.10). Коэффициент эффективности полива при увеличении скорости ветра до 4 м/с снижался с 0,72 до 0,46. При встречном или попутном ветре, дующем перпендикулярно к трубопроводу машины, $K_{эф.п}$ уменьшался до 0,49.

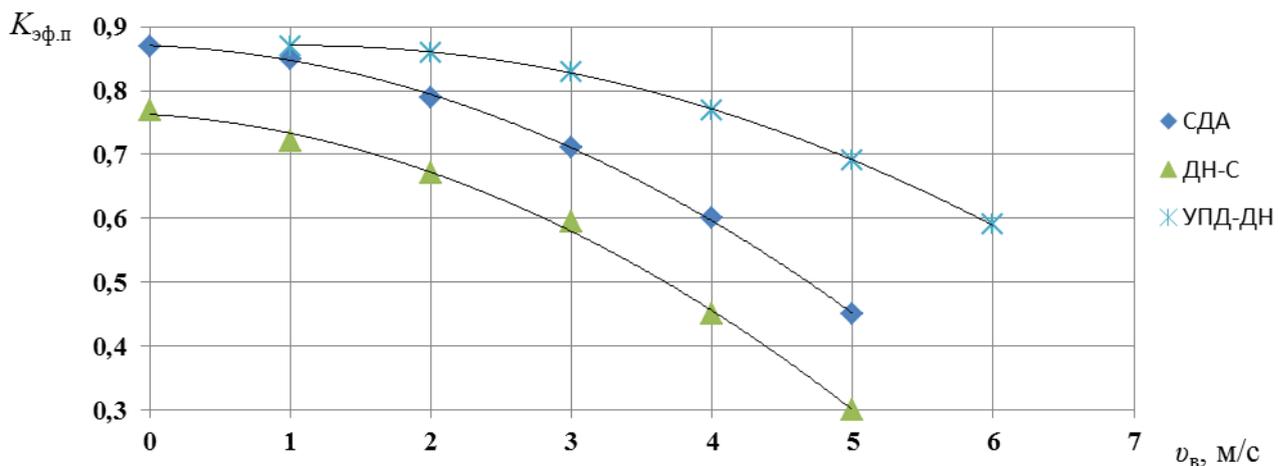


Рисунок 5.10 – Зависимость изменения коэффициента эффективности полива ДМ «Фрегат», оборудованных среднеструйными дождевальными аппаратами, дефлекторными насадками, установленными в стандартные штуцера, и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками, от скорости ветра

Таким образом, ДМ «Фрегат» с дождевальными насадками, смонтированными на устройствах приповерхностного дождевания, обеспечивает хорошую равномерность полива при ветре (рисунок 5.10). При этом коэффициент эффективности поли-

ва выше, чем у машины «Фрегат» со среднеструйными дождевальными аппаратами и серийными дефлекторными насадками, установленными в стандартные штуцера.

5.4 Оценка интенсивности дождя и энергетических показателей при поливе модернизированными ДМ «Фрегат»

Различные типы дождевальных устройств многоопорных дождевальных машин формируют дождь различной структуры, который отличается крупностью капель, интенсивностью и скоростью падения на почву. Среднеструйные дождевальные аппараты № 1, 2, 3 и 4 ДМ «Фрегат» образуют дождь со средним диаметром капель 0,86...1,57 мм и скоростью их падения – 3,82...5,16 м/с (таблица 5.19). Дождевальные насадки с дефлектором типа «обратный конус» формируют дождь с меньшим средним диаметром капель 0,5...0,86 мм и меньшей скоростью их падения – 2,9...3,8 м/с. Это обеспечивает снижение мощности дождя соответственно от 0,186 до 0,573 и от 0,013 до 0,07 Вт/м², или примерно в 8–9 раз.

Таблица 5.19 – Изменение крупности капель, средней и действительной мощности дождя, средней и мгновенной его интенсивности вдоль трубопровода ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-463-90 со среднеструйными дождевальными аппаратами и УПД с дождевальными насадками (расстановка через 5 и 6 м друг от друга)

Номер дождевателя	Тип дождевателя	Расход воды q , л/с	Давление P , МПа	Радиус захвата дождем R , м	Средняя и мгновенная интенсивность дождя, мм/мин		Средний диаметр капле дождя d_c , мм	Скорость падения капле $v_{п.}$, м/с	Средняя мощность дождя N_c , Вт/м ²	Действительная мощность дождя N_d , Вт/м ²
					ρ_c	ρ_m				
1–2	СДА	0,192	0,307	6,33	0,091	1,545	0,86	3,82	0,011	0,186
	УПД-ДН	0,152	0,10	3,85	0,197	0,195	0,50	2,91	0,013	0,013
2–3	СДА	0,415	0,432	11,1	0,112	1,525	0,70	3,44	0,011	0,150
	УПД-ДН	0,250	0,265	4,7	0,266	0,247	0,55	3,05	0,020	0,019
3–4	СДА	0,480	0,344	12,3	0,117	1,618	0,92	3,95	0,015	0,208
	УПД-ДН	0,291	0,150	5,1	0,342	0,216	0,58	3,13	0,028	0,017
4–5	СДА	0,825	0,455	14,9	0,166	1,948	0,85	3,80	0,020	0,231
	УПД-ДН	0,500	0,210	6,3	0,397	0,240	0,60	3,19	0,033	0,020
5–6	СДА	0,883	0,392	15,5	0,171	2,091	0,98	4,08	0,023	0,286
	УПД-ДН	0,536	0,240	6,5	0,494	0,243	0,66	3,34	0,045	0,022
6–7	СДА	1,016	0,360	15,1	0,202	1,808	1,07	4,26	0,030	0,270
	УПД-ДН	0,612	0,170	6,7	0,456	0,260	0,67	3,37	0,042	0,024
8–9	СДА	1,790	0,483	19,4	0,276	1,921	1,0	4,12	0,038	0,269
	УПД-ДН	1,000	0,278	8,4	0,595	0,271	0,70	3,44	0,058	0,026
11–12	СДА	2,420	0,448	23,3	0,311	2,050	1,24	4,58	0,054	0,355
	УПД-ДН	1,402	0,213	9,2	0,761	0,316	0,75	3,56	0,080	0,033
12–13	СДА	2,650	0,437	23,1	0,344	2,175	1,25	4,60	0,060	0,380
	УПД-ДН	1,536	0,256	9,7	0,768	0,312	0,80	3,68	0,086	0,035
13–14	СДА	2,870	0,429							
	УПД-ДН	1,668	0,302	10,1	0,834	0,318	0,82	3,73	0,096	0,036
14–15	СДА	3,090	0,423							
	УПД-ДН	1,802	0,240	10,2	0,883	0,344	0,84	3,77	0,104	0,040
15–16	СДА	3,320	0,421							
	УПД-ДН	1,932	0,197	10,1	0,956	0,369	0,86	3,82	0,115	0,044
Консоль	СДА	3,780	0,420	26,2	0,433	2,600	1,57	5,16	0,095	0,573
	УПД-ДН	3,78	0,237	12,9	1,200	0,430	0,86	3,82	0,145	0,070

Исследованиями установлено, что дождь в зависимости от его мощности оказывает различное энергетическое воздействие на почву. Дождь более высокой мощности разрушает ее верхний слой, ухудшает структуру. После дождя увеличивается плотность почвы.

Результаты замеров плотности верхнего слоя почвы (0–5 см) в зависимости от числа поливов, типа дождевателя, мощности дождя, вида сельскохозяйственных культур и характера рельефа приведены в таблице 5.20 и на рисунке 5.11.

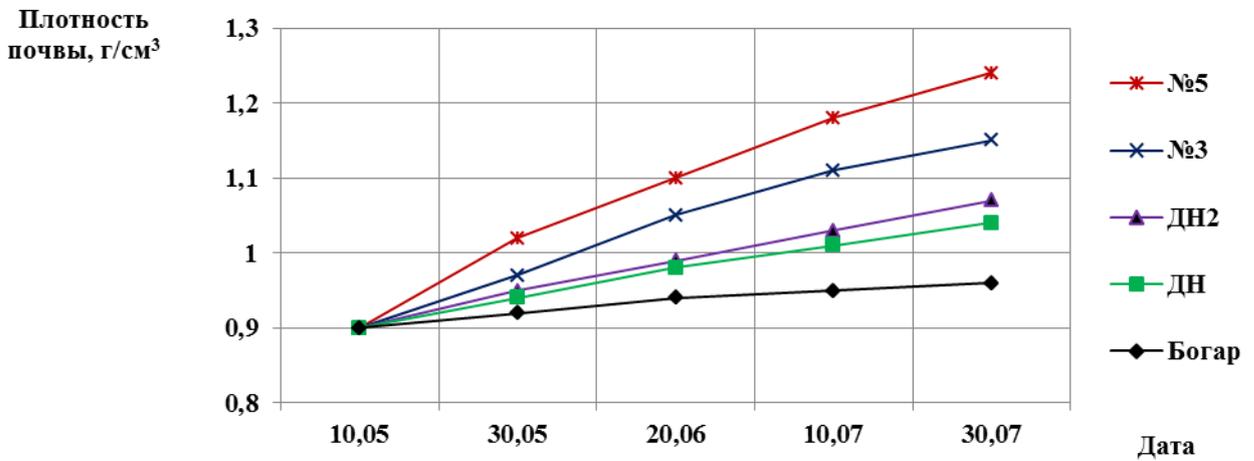
Таблица 5.20 – Плотность верхнего слоя почвы (0–5 см) при поливе ДМ «Фрегат» с различными типами дождевателей (2015 г.)

Место замера	Тип дождевателя	Мощность дождя, Вт/м ²	Плотность почвы, г/см ³
После 1-го полива ячменя, АО «Энгельское»			
Т1–2	СДА № 1	0,186	0,92
Т3–4	СДА № 2	0,208	0,96
Т7–8	СДА № 3	0,270	0,96
Т7–8	СДА № 3	0,290	1,02
Т14–15	СДА № 4	0,380	0,96
Т14–15	СДА № 4	0,405	1,02
КДА	СДА № 5	0,70	1,08
После 4-го полива сои, ООО «Березовское»			
Т2–3	СДА № 2	0,208	1,15
Т8–9	УПД-ДН	0,026	1,04
Т15–16	УПД-ДН	0,070	1,07
КДА	СДА № 5	0,70	1,24
Богара	–	–	1,06

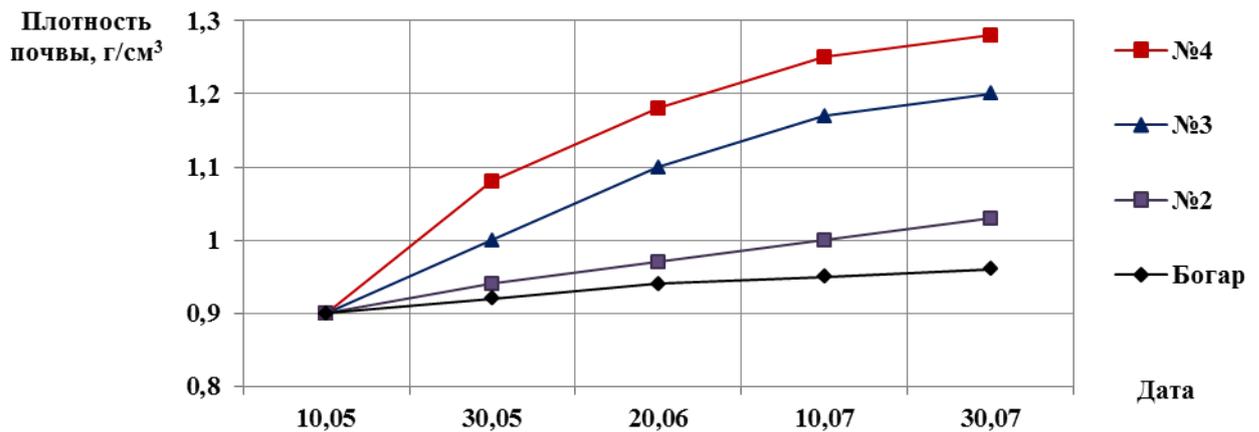
Примечание. Т – тележка.

Из таблицы 5.20 видно, что наибольшее энергетическое воздействие на почву оказывают среднеструйные дождевальные аппараты № 3 и 4 (мощность дождя $N_d = 0,270...0,405$ Вт/м²) и концевой дождевальный аппарат ($N_d = 0,70$ Вт/м²). Дождевальные насадки, установленные на УПД, как в начале, так и в конце машины ($N_d = 0,026...0,070$ Вт/м²), уплотняют верхний слой почвы незначительно. Благодаря уменьшению крупности капель и мощности дождя,

несмотря на увеличение его средней интенсивности, УПД обеспечивают поливные нормы до стока на уровне серийных аппаратов.



а



б

Рисунок 5.11 – Изменение плотности верхнего слоя почвы после четырех поливов ДМ «Фрегат», с различными типами дождевателей

Таким образом, исследования показали, что при поливе УПД с дождевальными насадками мелкокапельный дождь имеет незначительную мощность и не уплотняет верхний слой почвы. Плотность почвы даже после 4 поливов находится на уровне плотности почвы, на богарном участке (таблица 5.20, рисунок 5.11).

5.5 Влияние приповерхностного полива на влажность почвы и урожайность сельскохозяйственных культур

Эффективность работы ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания определяли в ОПХ «ВолжНИИГиМ», ООО «Березовское» Энгельсского района (приложения Н) и в ЗАО «АФ «Волга» Марковского района.

Урожайность сои в ООО «Березовское» Энгельсского района при поливе ДМ «Фрегат» с серийными дефлекторными насадками, установленными на трубопроводе, и с дождевальными насадками, смонтированными на УПД, приведены в таблице 5.21.

Таблица 5.21 – Урожайность сои и эффективность ее выращивания в ООО «Березовское» при поливе ДМ «Фрегат» с серийными дефлекторными насадками на трубопроводе машины и с дождевальными насадками на УПД

Показатели	Годы					
	2014		2015		2016	
	Тип дождевателя					
	ДН	УПД-ДН	ДН	УПД-ДН	ДН	УПД-ДН
Число поливов / оросительная норма полива, м ³ /га	6/3200		5/2700		2/1000	
Средняя урожайность, т/га	1,99	2,33	2,09	2,43	2,13	2,51
Прибавка урожая, т/га		0,34		0,34		0,38
НСР ₀₅	0,017		0,018		0,032	

Изменение влажности почвы в хозяйстве № 4 ООО «Березовское» (2016 г) до и после полива ДМ «Фрегат» с серийными дефлекторными насадками, установленными на трубопроводе, и с дождевальными насадками, размещенными на УПД, приведены в таблице 5.22, таблице 1 приложения М и на рисунке 5.12.

Таблица 5.22 – Запасы влаги в слое почвы 0–50 см и урожайность сои при поливе ДМ «Фрегат» с серийными дефлекторными насадками и УПД с дождевальными насадками (2016 г.)

Показатели	Тип дождевателя	
	ДН	УПД-ДН
Запасы влаги, мм		
исходные (6.05.16)	103,5	103,5
до первого полива (5.07.16)	60	60
полив нормой (6.07.16)	48	48
после полива (8.07.16)	90	100
до второго полива (23.07.16)	47	50,9
полив нормой (24.07.16)	48	48
после полива (25.07.16)	78	90
Запасы влаги на 29.08.16, мм	58	63
Суммарное испарение за период с 6.05 до 29.08.16	121,7	122,2
Средняя урожайность сои, т/га	2,13	2,51
Водопотребление, мм/т	53,5	50

Запасы влаги перед поливом ДМ «Фрегат» (6.05) в слое почвы 0–50 см составили 103 мм. В течение мая и июня прошли небольшие дожди нормой от 50 до 200 м³/га, всего – 12. Однако с увеличением температуры воздуха и снижением влажности почвы запасы влаги постепенно снизились до 60 мм перед поливом (6.07). После полива (8.07) они увеличились до 90 и 100 мм. Прибавка влаги составила соответственно 30 и 40 мм при средней норме полива 48 мм и после двух суток испарения влаги с почвы и потребления ее соей.

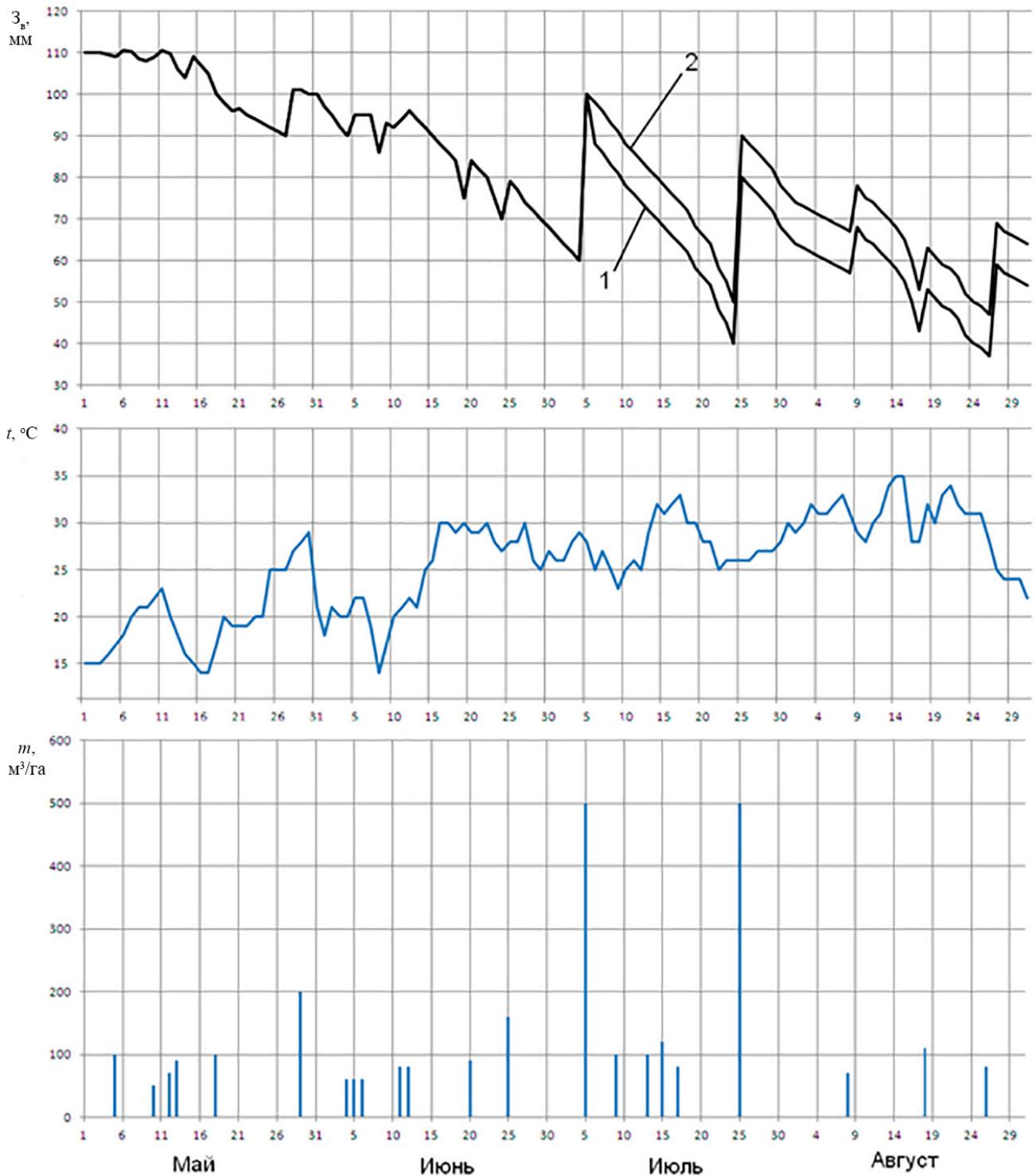


Рисунок 5.12 – Зависимость изменения запасов влаги в почве $Z_{в}$, мм, от температуры воздуха t , °C, осадков и поливов, m , м³/га, ДМ «Фрегат» с дефлекторными насадками (1) и УПД с дождевальными насадками (2) в хозяйстве № 4 ООО «Березовское» за вегетационный период 2016 г.

Перед вторым поливом запасы влаги в почве были небольшие – 47 и 50,9 мм. После второго полива нормой 48 мм (25.07) они увеличились до 78 и 90 мм. Запа-

сы влаги в слое 0–50 см в зоне полива УПД с дождевальными насадками повысились на 13,3 %.

К концу вегетации после прошедших дождей запасы влаги в почве на 29.08 при поливе серийными дефлекторными насадками и УПД с дождевальными насадками составили соответственно 58 и 63 мм. Общий запас влаги в слое почвы 0–50 см в зоне полива УПД с дождевальными насадками увеличился на 7,9 %.

Средний урожай сои на участках полива дождевальными насадками, установленными на УПД, выше на 0,34...0,38 т/га (в среднем на 0,35 т/га), или на 17 %, чем на участках полива серийными дефлекторными насадками, смонтированными на трубопроводе. Дисперсионный анализ полученных данных показал их значительное различие на 5%-м уровне значимости $НСР_{05} = 0,442...0,642$, точность опыта 2,04...2,76 % (приложения И, К и Л). Это достигнуто за счет более равномерной подачи оросительной воды; снижения влажности почвы, среднего диаметра капель дождя и его мощности; уменьшения плотности верхнего слоя почвы; увеличения роста растений.

Средняя прибавка урожая сои составила 0,35 ц/га, дополнительный валовой сбор ее на площади полива 66 га ДМ «Фрегат» в хозяйстве № 4 – 0,35 т/га · 66 га = 23,1 т. При стоимости 1 т зерна сои 22 000 руб. экономический эффект составил:

$$\mathcal{E}_p = 23,1 \text{ т} \cdot 22000 \text{ руб.} = 508200 \text{ руб.} = 508,2 \text{ тыс. руб. на машину.}$$

5.6 Надежность работы разработанных устройств приповерхностного дождевания и затраты на их изготовление

Исследования УПД типа «сборный рукав» (патенты № 170892 и № 169912, приложение О) показали его высокую надежность в работе в результате упрощения конструкции, слива воды после поливов, уменьшения реактивного момента при выходе струи из сопла и изготовления дождевальной насадки из полимерного материала. Надежность дождевальных насадок обеспечивает отсутствие вращающихся частей. Срок их службы достигает 10–15 лет.

Обследования выявили незначительный процент отказа дождевальных насадок в результате слома ножки (брак при отливке, небрежное отношение операторов и др.) или ее засорения мусором. Масса УПД типа «сборный рукав» меньше УПД типа «вертикальная штанга» на 40 %, что снижает его стоимость и трудовые затраты на монтаж и демонтаж в 25% (таблица 5.23).

Таблица 5.23 – Сравнительные эксплуатационные показатели УПД

Эксплуатационные показатели	УПД			
	Вертикальная штанга (базовый вариант)	Сборный рукав	Сборная штанга	Поворотная штанга
Длина, м. - стальной трубы УПД	2,0	0,3	0,3	2,0
- гибкой полиэтиленовой трубы или напорного рукава	2,5	1,8	1,8	-
Масса УПД, кг, без воды	10,0	8,1	7,6	9,6
- с водой	11,0	8,6	8,6	10,6
Трудовые затраты на монтаж и демонтаж УПД, чел. – ч.	0,6	0,3	0,3	0,6
Стоимость, руб./ шт. (тыс. руб. за 1 комплект на ДМ Фрегат)	1200 90,0	600,0 45,0	550,0 41,25	700,0 52,5

Повышение надежности в работе УПД типа «сборный рукав» по сравнению с УПД «вертикальная штанга» (А.С. № 1780651) обусловлено заменой ненадежного регулировочного болта М8 на М12 хомута, который часто ломается при коррозии. УПД типа «сборный рукав» имеют простую конструкцию. Их легко изготавливать с помощью токарного, сварочного и слесарного оборудования. Трудовые затраты на их монтаж весной и демонтаж осенью – низкие. Перечисленные преимущества УПД позволяют рекомендовать их для использования в орошаемых хозяйствах Саратовской области.

5.7 Экономическая эффективность внедрения устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками на ДМ «Фрегат»

Использование устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками, устанавливаемых через 5 и 6 м друг от друга на трубопроводе ДМ «Фрегат», позволяет повысить равномерность полива, снизить воздействие дождя на почву и ее уплотнение, благодаря меньшему диаметру капель, уменьшить потери воды на испарение и унос ветром, что обеспечит повышение урожайности сои на 17 %.

Экономический эффект от внедрения УПД с дождевальными насадками на ДМ «Фрегат» составил 508,2 тыс. руб. на машину (таблица 5.24).

Таблица 5.24 – Экономическая оценка внедрения устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками на ДМ «Фрегат» в ООО «Березовское»

Показатели работы	Базовая ДМ «Фрегат» с ДН	Модернизированная ДМ «Фрегат», УПД-ДН
Сельскохозяйственная культура.	СОЯ	
Коэффициент эффективного полива при скорости ветра 3,7 м/с.	0,59	0,74
Потери воды на испарение и снос %.	16	8,3
Крупность капель дождя, мм.	0,8	0,8
Скорость падения капель дождя м/сек.	3,7(2.5м)	2,3(1м)
Мощность дождя, Вт/м. ²	0,39	0,28
Урожайность сои, т/га за 3 года.	2,07	2,42
Прибавка урожая, т/га.	-	0,35
Годовой экономический эффект, тыс. руб./маш.	-	508,2

При стоимости одного комплекта УПД типа «сборный рукав», «сборная штанга» и «поворотная штанга» для 16-опорной ДМ «Фрегат» соответственно 41,25; 45,0 и 52,5 тыс. руб. оборудование окупается в первый год эксплуатации.

5.8 Выводы

1. Исследованиями установлено, что 12, 13 и 16-опорные ДМ «Фрегат» марки ДМУ-Б-328-45, ДМ-365-68 и ДМУ-Б-463-90 с устройствами приповерхностного дождевания обеспечивают заданный расход воды соответственно 45, 68 и 90 л/с при давлении на входе в низкоопорную машину 0,36, 0,41 и 0,48 МПа и в серийную машину 0,44, 0,53 и 0,60 МПа. Устройства приповерхностного дождевания с дождевальными насадками требуется устанавливать через 5 и 6 м друг от друга в соответствии с разработанными картами настройки.

2. Высота полета дождевых струй ДМ «Фрегат» с дождевальными насадками «обратный конус», установленными на устройствах приповерхностного дождевания, уменьшается до 1,1...1,6 м над поверхностью поля, что способствует снижению потерь воды на испарение и унос ветром с 3,8–20 % до 0,6–9 %, или в 2 раза, в зависимости от погодных условий.

3. Исследования показывают, что УПД с дождевальными насадками «обратный конус» формируют мелкокапельный дождь. В начале машины средний диаметр капель составляет 0,15...0,60 мм, в конце – 0,82...0,86 мм. Скорость падения капель дождя среднеструйных аппаратов вдоль трубопровода машины «Фрегат» изменяется от 3,8 до 5,2 м/с, дождевальных насадок – снижается до 2,9 до 3,8 м/с, или примерно в 1,5 раза. При этом уменьшается энергетическое воздействие на почву и сельскохозяйственные культуры и снижается плотность верхнего слоя почвы. Несмотря на увеличение средней интенсивности дождя УПД, норма полива до стока дождевальными насадками находится на уровне серийных дождевальных аппаратов «Фрегат».

4. Устройства приповерхностного дождевания с дождевальными насадками при оптимальном угле подъема струй к горизонту 20 град и распылении струй дождя обеспечивают высокую равномерность полива. При средней скорости ветра в Саратовской области 3...4 м/с коэффициент эффективности полива повышается на 18–23 % и составляет 0,71...0,76.

5. При использовании устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками в ООО «Березовское», запасы влаги в почве после двух поливов увеличились в среднем на 7,9–13,3 %. Расстановка УПД с дождевальными насадками по учащенной схеме за счет более равномерной подачи оросительной воды, снижение потерь воды на испарение и унос ветром, уменьшение среднего диаметра капель и мощности дождя в конце машины обеспечивает повышение урожайности сои на 17,4 %.

Экономический эффект от внедрения УПД с дождевальными насадками составил 508, тыс. руб. на машину (цены 2016 г.). При цене одного комплекта на дождевальную машину УПД с дождевальными насадками от 41,25 до 52,5 тыс. руб. устройства окупаются в первый год эксплуатации.

6. В орошаемых хозяйствах внедрено более 10 устройств приповерхностного дождевания с дождевальными насадками, монтируемых на трубопроводах машин через 5 и 6 м друг от друга, в том числе на 2 машинах в ОПХ ФГБНУ «ВолжНИИГиМ» и ООО «Березовское» Энгельсского района, на 8 машинах в ЗАО «АФ «Волга» Марковского района и др.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Анализ проведенных исследований качества полива ДМ «Фрегат» показал недостаточную равномерность полива при ветре и значительные потери воды на испарение, и унос ветром. Существующие устройства приповерхностного дождевания имеют значительную металлоемкость в работе, высокую стоимость. Они сложны в регулировке, а также трудоемки в изготовлении, при монтаже и демонтаже.

На основе теоретических исследований технологического процесса приповерхностного полива разработана дождевальная насадка с дефлектором «обратный конус» (патент № 170892), которая обеспечивает слив воды из устройства приповерхностного дождевания и минимизирует реактивный момент при выходе струи из сопла. Применение таких дождевальных насадок позволило упростить конструкцию УПД (патент №169912), повысить надежность конструкции, увеличить ширину и площадь полива дождем, уменьшив среднюю интенсивность дождя.

2. Исследованиями дождевальной насадки с дефлектором «обратный конус» установлены математические зависимости расхода воды и дальности полета струй дождя от диаметра сопла, давления на выходе струи из сопла и высоты установки насадки относительно поверхности почвы. Получены формулы для расчета крупности капель дождя в любой точке радиуса полива УПД с дождевальной насадкой.

3. Усовершенствована методика расчета эпюры распределения дождя дождевальной насадкой, состоящей из эпюр от основной и дополнительной частей струи, которая позволила повысить точность расчета распределения дождя вдоль радиуса полива. Получена зависимость интенсивности дождя в месте установки дождевальной насадки от диаметра сопла и рабочего давления.

4. Дождевальные машины «Фрегат» с УПД и дождевальными насадками формируют мелкокапельный дождь, что обеспечивает повышение равномерности полива при скорости ветра 3...4 м/с от 0,70...0,75, или на 6,6–14,2 %, в сравнении со среднеструйными аппаратами и на 20...35% с дефлекторными насадками. Дождевальные насадки при меньшей крупности капель снижают скорость их падения с 3,8...5,2 м/с до 2,9...3,8 м/с. Средняя крупность капель дождя дождевальных на-

садок составляет 0,5...0,86 мм, что в 1,5–2,0 раза меньше, чем у среднеструйных дождевальных аппаратов.

5. Испытания ДМ «Фрегат» различных модификаций с дождевальными насадками, установленными на УПД согласно рассчитанным картам настройки, подтверждает, что расход воды, как при низком, так и высоком давлении соответствует стандартным значениям.

Потери воды на испарение и унос ветром при поливе ДМ «Фрегат» с УПД уменьшаются до 6–12 % за счет снижения высоты подъема дождевого облака с 4...7 до 1,1...3,5 м над поверхностью почвы и до 1,0...1,5 м над растениями.

6. Улучшение показателей качества полива способствует повышению урожайности сои в среднем на 0,35 т/га и обеспечивает годовой экономический эффект от внедрения устройств приповерхностного дождевания на ДМ «Фрегат» 508,2 тыс. руб. на машину.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПРОИЗВОДСТВУ

1. Разработанные устройства приповерхностного дождевания с дождевальными насадками типа «обратный конус» рекомендуется устанавливать на трубопровод ДМ «Фрегат» через 5 и 6 м друг от друга. Настройку дождевальных насадок на заданный расход воды следует производить согласно рассчитанным картам для серийных и низконапорных ДМ «Фрегат» различных модификаций.

2. Полученные математические зависимости и программа расчета эпюр распределения дождя вдоль радиуса полива рекомендуется использовать в научно-исследовательских и учебных заведениях, а также в организациях, производящих дождевальные машины.

ПЕРСПЕКТИВЫ ДАЛЬНЕЙШЕЙ РАЗРАБОТКИ ТЕМЫ

Совершенствование технологического процесса полива для обеспечения экологически безопасного полива дождеванием и повышения урожайности сельскохозяйственных культур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Абдразаков, Ф. К.* Совершенствование поливной техники для полива сельскохозяйственных культур дает ощутимую экономическую и экологическую эффективность / Ф. К. Абдразаков, Е. В. Фиалковская // Современные проблемы развития АПК : материалы науч.-практ. конф. / Волгогр. гос. с.-х. акад. – Волгоград, 2006. – С. 85–88.
2. *Абдразаков, Ф. К.* Методические вопросы оценки эффективности совершенствования поливной техники / Ф.К. Абдразаков, В. А.Щербаков // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н. И. Вавилова. – 2008. – № 8. – С. 56–58.
3. *Абрамов, А. М.* Методы определения эрозионно допустимых поливных норм при дождевании : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Абрамов Анатолий Михайлович. – М., 1987. – 18 с.
4. *Айдаров, Н. П.* Оросительные мелиорации / Н. П. Айдаров, А. И. Голованов. – М. : Колос, 1982. – 176 с.
5. *Алферов, Ю. В.* Технология орошения дождеванием на уплотненных южных черноземах : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Алферов Юрий Вадимович. – М., 1989. – 23 с.
6. *Багров, М. Н.* Оросительные системы и их эксплуатация / М. Н. Багров, И. П. Кружилин. – М. : Колос, 1978. – 208 с.
7. *Безуевский, И. Л.* Техничко-экономическая оценка орошения хлопчатника дождевальной машиной «Фрегат» / И. Л. Безуевский // Новая техника в эксплуатации оросительных систем Средней Азии и Казахстана : сб. науч. тр. / САНИИРИ. – Ташкент, 1974. – Вып. 141. – С. 3–9.
8. *Бондарев, А. А.* Моделирование оптимальных процессов дождевания сельскохозяйственных культур среднеструйными дождевальными аппаратами для по-

вышения равномерности полива : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бондарев А. А. – зерноград, 1999. – 20 с.

9. *Бончковский, Н. Ф.* Исследование равномерности распределения искусственного дождя на математических моделях : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бончковский Н. Ф. – М., 1970. – 21 с.

10. *Бородин, В. А.* Распыливание жидкостей / В. А. Бородин. – М. : Машиностроение, 1967. – 262 с.

11. *Бредихин, Н. П.* Влияние ветра на работу дальнеструйных дождевателей и пути повышения качества полива : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Бредихин Николай Петрович. – М., 1969. – 19 с.

12. *Бредихин, Н. П.* Улучшение качества работы одиночных дальнеструйных аппаратов при ветре / Н. П. Бредихин // Вопросы механизации орошения сельхозкультур : материалы НТС ВИСХОМ. – М., 1966. – Вып. 21. – С. 319–330.

13. *Бубенчиков, М. А.* О снижении энергоемкости полива короткоструйными дефлекторными насадками / М. А. Бубенчиков, А. Н. Данильченко, Н. П. Пацер // Экологическое и экономическое обоснование технологии и технических средств полива : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – М., 1989. – С. 42–47.

14. *Булиенко, Л. М.* Характеристика полива сельхозкультур ДМ «Фрегат» в условиях юга Украины / Л. М. Булиенко // Вопросы строительства и эксплуатации мелиоративных систем : сб. науч. тр. / УкрНИИГиМ. – Киев, 1978. – С. 38–49.

15. *Варлев, И.* Оптимальная равномерность полива / И. Варлев // Гидравлика и мелиорация. – 1981. – № 6. – С. 77–81.

16. *Васильев, А. Г.* Исследование стационарной дождевальной системы с дефлекторными насадками в теплицах : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Васильев Анистрад Григорьевич. – М., 1978. – 21 с.

17. *Васильев, Б. А.* И Исследование распределения капель в факеле распыленной жидкости / Б. А. Васильев, С. П. Ильин // Новое в технике и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 6. – С. 80–86.

18. Водный режим почвогрунтов при орошении ДМ «Фрегат» / В. А. Емельянов [и др.] // Гидротехника и мелиорация. – 1976. – № 1. – С. 46–51.
19. Волков, В. А. Приближенный расчет движения тел в сопротивляющейся среде / В. А. Волков // Труды ВИСХОМ. – М. : ЦБТИ, 1959. – Вып. 24. – 17 с.
20. 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.
21. Гаврилица, О. А. Эрозионная деградация черноземов при поливе дождеванием и пути ее предупреждения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Гаврилица О. А. – Кишинев, 1991. – 48 с.
22. Гаврилица, О. А. Эрозионные процессы при поливе дождеванием и пути их минимизации / О. А. Гаврилица // Почвоведение. – 1993. – № 3. – С. 77–84.
23. Гаджиев, Г. М. Исследование и обоснование оптимальных параметров дождя «Фрегат» для орошения приоазисных песков : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гаджиев Г. М. – М., 1979. – 18 с.
24. Гаджиев, Г. М. К вопросу использования дождевальных машин «Фрегат» при орошении приоазисных песчаных земель / Г. М. Гаджиев // Тракторы и сельхозмашины. – 1976. – № 11. – С. 20–21.
25. Гаджиев, Г. М. Особенности орошения приоазисных песков дождеванием / Г. М. Гаджиев, Ю. С. Пунинский // Гидротехника и мелиорация. – 1979. – № 5. – С. 38–41.
26. Гаджиев, Г. М. Скорость падения капель дождя, создаваемого дождевальной машиной «Фрегат» / Г. М. Гаджиев // Тракторы и сельхозмашины. – 1977. – № 7. – С. 26–27.
27. Гарюгин, Г. А. Режим орошения сельскохозяйственных культур / Г. А. Гарюгин. – М. : Колос, 1979. – 269 с.
28. Голы, М. Оросительные мелиорации / М. Голы. – М. : Колос, 1988. – 189 с.

29. *Гомберг, С. В.* Совершенствование технико-технологических показателей полива дождевальными машинами «Фрегат» : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Гомберг Сергей Владимирович. – Саратов, 2007. – 19 с.
30. *Гордон, С. М.* Орошение дождеванием и ветровой режим Поволжья / С. М. Гордон, В. Н. Бережнова // Дождевание сельскохозяйственных культур : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1973. – Т. 4. – С. 17–25.
31. *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.
32. *Городничев, В. И.* Оценка крупности капель / В. И. Городничев // Основные направления технического прогресса механизации и техники полива : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – М., 1983. – С. 102–110.
33. ГОСТ Р53056–2008. Техника сельскохозяйственная. Методы экономической оценки / ФГНУ «РосНИИТиМ. – М. : Стандартинформ, 2009. – 23 с.
34. *Григорьев, В. А.* Прогноз и предупреждение эрозии почв при орошении / В. А. Григорьев, С. Ф. Краснов. – М. : Изд-во Моск. ун-та, 1992. – 206 с.
35. *Гринь, Ю. И.* Совершенствование оросительных систем на основе ресурсосберегающих технологий и средств орошения : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Гринь Юрий Иванович. – Киев, 2000. – 50 с.
36. *Губер, К. В.* Ресурсосберегающие технологии и конструкции оросительных систем при дождевании : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Губер Кирилл Вадимович. – М., 2000. – 48 с.
37. *Гусейн-Заде, С. Х.* Многоопорные дождевальные машины / С. Х. Гусейн-Заде, Л. А. Перевезенцев, В. И. Коваленко. – М. : Колос, 1984. – 191 с.
38. Дождевальная машина ДМУ. Руководство по эксплуатации ДМУ-00.000 РЭ. – М., 1976. – 32 с.
39. *Доспехов, Б. А.* Методика полевого опыта / Б. А. Доспехов. – М. : Колос, 1973. – 336 с.

40. Дулов, И. Потери воды при дождевании / И. Дулов // Мелиорация. – 1975. – № 8. – С. 16–18.
41. Дунский, В. Ф. Пестицидные аэрозоли / В. Ф. Дунский, В. Н. Никитин, М. С. Соколов. – М. : Наука, 1982. – 287 с.
42. Ермаков, Б. С. Мелкодисперсный распылитель воды для зеленого черенкования / Б. С. Ермаков, С. П. Ильин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1977. – № 6. – С. 46–47.
43. Ерхов, Н. С. Влияние эрозионно допустимых поливных норм на режим орошения сельскохозяйственных культур при дождевании / Н. С. Ерхов // Основные вопросы совершенствования техники и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНПО «Радуга». – М., 1981. – С. 135–141.
44. Ерхов, Н. С. Определение крупности капель дождя с помощью бумажных фильтров / Н. С. Ерхов, Г. П. Лямперт // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 1971. – № 10. – С. 31–33.
45. Ерхов, Н. С. Поливной режим как элемент технологии полива / Н. С. Ерхов // Мелиорация и водное хозяйство. – 1996. – № 4. – С. 16–19.
46. Ерхов, Н. С. Экспериментальное изучение безнапорного впитывания воды в почву при поливе дождеванием в условиях Центрального района Нечерноземной зоны СССР : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ерхов Николай Сергеевич. – М., 1966. – 18 с.
47. Зак, Е. Г. Кинетика испарения капли воды в воздушном потоке // Геофизика. – 1936. – Т. VI. – Вып. 5.
48. Иванов, В. А. Техничко-эксплуатационная характеристика работы машины «Фрегат» в совхозах «Быковский» и «Россия» в Заволжье Волгоградской области / В. А. Иванов, С. Н. Незнаенко : материалы Всесоюзного совещания по проектированию и строительству совершенных оросительных систем и механизации полива. – М., 1972. – С. 11–12.

49. *Иванов, В. А.* Учет потерь воды при поливе дождеванием / В. А. Иванов. – Волгоград, 1978. – С. 21–26. – (Труды / Волгоградский СХИ ; т. 76).
50. *Исаев, А. П.* Гидравлика дождевальных машин / А. П. Исаев. – М. : Машиностроение, 1973. – 215 с.
51. *Исаев, А. П.* Оценка технологических возможностей дождевальной техники на основе определения допустимых норм полива / А. П. Исаев // Улучшение эксплуатации оросительных систем и планировка орошаемых земель. – М. : Колос, 1982. – С. 67–78.
52. Исследования режима орошения и техники полива сельскохозяйственных культур в Сыртовой части массива Куйбышевской обводнительно-оросительной системы : отчет о НИР / ВолжНИИГиМ ; рук. Клепальский А. П. – Энгельс, 1976. – 172 с.
53. *Казаков, С. П.* Рациональная расстановка дождевальных насадов / С. П. Казаков // Гидротехника и мелиорация. – 1953. – № 4. – С. 37–44.
54. *Калашников, А. А.* Определение качества дождя при работе дождевальных аппаратов, установок и машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Калашников А. А. – Ставрополь, 1973. – 20 с.
55. *Кальянов, Г. С.* О потерях оросительной воды при поливе дождеванием / Г. С. Кальянов // Гидротехника и мелиорация. – 1954. – № 11. – С. 11–13.
56. *Каштанов, В. В.* Технология и дождевальная установка для орошения приусадебных и садово-огородных участков : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Каштанов Василий Васильевич. – Рязань, 2005. – 26 с.
57. *Кван, Р. А.* Установление потерь оросительной воды в процессе полива дождеванием / Р. А. Кван, В. В. Немченко, А. Н. Аяббертепов // Обводнение и сельхозводоснабжение : сб. науч. тр. / САНИИРИ. – Ташкент, 1978. – Вып. 155. – С. 50–57.
58. К вопросу улучшения эксплуатационных показателей полива ДМ «Фрегат» / Н. Ф. Рыжко [и др.] // Технические, технологические и экологические про-

блемы орошения земель Поволжья : сб. науч. тр. по материалам юбил. конф., посвященной 40-летию ВолжНИИГиМа. – Саратов, 2006. – С. 22–33.

59. *Клепальский, А. П.* Влияние интенсивности дождя на поливные нормы в зоне Сыртового Заволжья / А. П. Клепальский, В. Н. Корочков, А. Я. Божкова // Орошение земель в Поволжье. – Саратов, 1973. – С. 108–117.

60. *Клепальский, А. П.* Качество дождя машин ДКШ-64 и АДП-350 при орошении в зоне Сыртового Заволжья / А. П. Клепальский // Орошение земель в Поволжье. – Саратов, 1973. – С. 108–117.

61. *Колганов, А. В.* Научные основы развития орошения и техническое совершенствование оросительных систем в засушливой зоне Российской Федерации : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Колганов Александр Васильевич. – М., 2000. – 52 с.

62. *Колесников, Ф. И.* Методика оценки эффективности дождевальных машин / Ф. И. Колесников. – М., 1975. – 157 с.

63. *Колесников, Ф. И.* Новая дождевальная техника и оценка ее эффективности / Ф. И. Колесников : обзорная информация ЦНИИТЭИ. – В/О «Сельхозтехника». – М., 1973. – 59 с.

64. *Колесников, Ф. И.* Оценка существующей техники и перспективы ее развития / Ф. И. Колесников // Вестник сельскохозяйственных наук. – 1986. – № 12. – С. 71–73.

65. *Костин, И. С.* Итоги работ по обоснованиям способов и техники полива в зоне Саратовского Заволжья / И. С. Костин, А. П. Клепальский, В. Н. Корочков // Технология полива сельскохозяйственных культур : сб. науч. тр. / ВАСХНИЛ. – М., 1972. – С. 59–67.

66. *Краковец, В. М.* Справочник оператора «Фрегата» и «Волжанки» / В. М. Краковец, С. Н. Никулин. – М. : Колос, 1976. – 240 с.

67. *Краснощеков В. С.* Влияние равномерности полива на урожай сельхозкультур / В. С. Краснощеков // Новое в технике и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНПО «Радуга». – М., 1976. – Вып. 9. – С. 88–97.

68. *Краснощеков, В. С.* Энергетическая оценка качества дождя машин «Фрегат» и «Волжанка» / В. С. Краснощеков // Новое в технике и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНПО «Радуга». – М., 1979. – Вып. 12. – С. 88–97.

69. *Кружилин, И. П.* Улучшение качества полива машиной «Фрегат» в Волгоградском Заволжье / И. П. Кружилин, П. И. Кузнецов // Гидротехника и мелиорация. – 1976. – № 12. – С. 29–35.

70. *Кузнецов, М. С.* Ирригационная эрозия почв и ее предупреждение при поливах дождеванием / М. С. Кузнецов, В. Я. Григорьев, К. Ф. Хан. – М. : Наука, 1990. – 120 с.

71. *Кузнецов, П. И.* Исследования параметров структуры дождя и качества полива машин кругового действия в Волгоградском Заволжье : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Кузнецов Петр Иванович. – Новочеркасск, 1983. – 20 с.

72. *Ландес, Г. А.* Эксплуатация широкозахватных дождевальных машин и результаты исследований их работы в производственных условиях / Г. А. Ландес, В. Г. Луцкий, С. М. Давшан // Широкозахватные дождевальные машины «Фрегат» и «Волжанка» : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 5. – С. 198–297.

73. *Ларионова, А. М.* Впитывающая способность почв при поливе дождеванием : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Ларионова Антонина Михайловна. – М., 2004. – 39 с.

74. *Ларионова, А. М.* Полив дождеванием без поверхностного стока / А. М. Ларионова // Защитное лесоразведение и мелиорация земель в степных и лесостепных районах России : сб. науч. тр. – Волгоград, 1998. – С. 162–164.

75. *Лебедев, Б. М.* Дождевальные машины / Б. М. Лебедев // Теория и конструкции. – М. : Машиностроение, 1977. – 246 с.

76. *Литвиненко, А. Ф.* К вопросу определения расчетной энергетической характеристики дождя для стационарных оросительных систем / А. Ф. Литвиненко // Оптимизация технических средств и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – М., 1985. – С. 172–179.

77. *Лямперт, Г. П.* Дождевание при ветре ДДН-70 при изменении угла наклона ствола аппарата / Г. П. Лямперт // Новое в технике и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНПО «Радуга». – М., 1980. – С. 54–58.

78. *Мансуров, М. С.* Расчет потерь воды на испарение при поливе дождеванием / М. С. Мансуров // Использование пресных и минеральных вод при орошении и промывке земель : сб. науч. тр. / ВНИИГиМ. – М., 1971. – С. 29–44.

79. *Марквартде, В. М.* Метод расчета основных параметров дождевальных аппаратов / В. М. Марквартде // Вопросы механизации орошения сельскохозяйственных культур : материалы НТС. – М., 1966. – Вып. 21. – С. 54–63.

80. Математическая статистика. – М. : Высшая школа, 1975. – 398 с.

81. Методические рекомендации по определению эффективности научно-технической продукции (завершенных НИОКР) в АПК / МГНУ ВНИИ ЭСХ. – М., 2004. – 46 с.

82. *Миленин, Б. О.* Исследование интенсивности искусственного дождя и выбор ее значения при проектировании дождевальных машин / Б. О. Миленин // Вопросы механизации орошения сельскохозяйственных культур в СССР : материалы НТС. – М., 1966. – Вып. 21. – С. 180–196.

83. Многоопорная дождевальная машина : А. с. 1113050 СССР : А 01 J 25/09 / И. А. Божко [и др.] (СССР). – № 3264245/30–15; заявл. 19.03.81 ; опубл. 15.09.84, Бюл. № 34.

84. Многоопорная дождевальная машина : А. с. 1780651A1 СССР : А 01 J 25/09 / Н. Е. Чубиков [и др.] (СССР). – № 4943361/15 ; заявл. 25.03.91 ; опубл. 15.12.92, Бюл. № 46.

85. Модернизация дождевого пояса дождевальной машины «Фрегат» / А. И. Рязанцев [и др.] // Проблемы и перспективы совершенствования технологии водоснабжения : сб. науч. тр. / ВНИИ «Радуга». – Коломна, 2001. – С. 71–76.

86. *Москвичев, Ю. А.* Агрономическая оценка полива широкозахватными дождевальными машинами / Ю. А. Москвичев // Широкозахватные дождевальные машины «Фрегат» и «Волжанка» : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП.– Коломна, 1974. – Т. 5. – С. 60–104.

87. *Москвичев, Ю. А.* Дождевальная техника для Поволжья / Ю. А. Москвичев, В. П. Сорочкин, В. С. Краснощеков // Агротехническая и технико-эксплуатационная оценка способов полива сельскохозяйственных культур в Поволжье : материалы обл. науч.-техн. конф. – Волгоград, 1974. – С. 58–65.

88. *Москвичев, Ю. А.* Условия оптимального применения дождевальной техники / Ю. А. Москвичев, Н. М. Шевцов // Оптимизация параметров поливной техники : сб. науч. тр. / ВНИИМитП. – Коломна, 1974. – Т. 7. – С. 62–73.

89. *Мустафаева, М. К.* Исследование среднеструйных разбрызгивателей в условиях Азербайджанской ССР : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Мустафаева М. К. – Баку, 1962. – 19 с.

90. *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.

91. *Нагорный, В. А.* Повышение эффективности полива ДМ «Фрегат» при использовании новых дождеобразующих устройств / В. А. Нагорный, Н. Ф. Рыжко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2009. – № 3. – С. 35–37.

92. *Надежкина, Г. П.* Совершенствование устройств приповерхностного дождевания дождевальной машины «Фрегат» : дис. ... канд. техн. наук : 220:061.06 : защищена 12.12.2014 / Надежкина Г. П. – Саратов, 2014. – 167 с.

93. *Назаров, М. И.* Дождевание сельскохозяйственных культур и перспективы его применения в Киргизии / М. И. Назаров. – Фрунзе, 1966. – 98 с.

94. *Назаров, М. И.* Потери воды на испарение в воздухе и снос ветром при дождевании / М. И. Назаров // Вопросы водного хозяйства. – Фрунзе : Кыргызстан, 1973. – Вып. 31. - С. 34-42.

95. Низконапорные короткоструйные насадки широкозахватной техники / А. В. Угрюмов [и др.] : экспресс-информация : Мелиорация и водное хозяйство. Орошение и оросительные системы : ЦБНТИ. – М., 1981. – С. 4–15. – (Серия 1 ; вып. 10).

96. *Никулин, С. Н.* Ресурсосберегающие технологии орошения / С. Н. Никулин // Гидротехника и мелиорация. – 1991. – № 4. – С. 27–31.

97. *Носенко, В. Ф.* Оптимизация технологического процесса полива / В. Ф. Носенко // Экологически и экономически обоснованные технологии и технологические средства полива : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – М., 1989. – С. 3–12.

98. *Носенко, В. Ф.* Принципы и основные положения методики районирования орошаемых земель по прогнозируемой технике полива / В. Ф. Носенко // Оптимизация параметров поливной техники : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 7. – С. 28–61.

99. *Носенко, В. Ф.* Требования и принципы создания поливной техники (оросительных систем) нового поколения / В. Ф. Носенко // Техника орошения и сельхозводоснабжение нового поколения : сб. науч. тр. / ВНИИ «Радуга». – Коломна, 1998. – С. 3–13.

100. *Носенко, В. Ф.* Система показателей технического уровня дождевальной техники / В. Ф. Носенко, Г. А. Ландес, Е. И. Балабан // Техника орошения и сельхозводоснабжение нового поколения : сб. науч. тр. / ВНИИ «Радуга». – Коломна, 1998. – С. 28–47.

101. *Нуриддинов, Т. Н.* Исследование и изыскание рациональных параметров коромыслового привода среднеструйных дождевальных аппаратов : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Нуриддинов Ташнияз Нуриддинович. – М., 1975. – 22 с.

102. Обоснование оптимальной длины широкозахватных дождевальных машин, работающих в движении по кругу / Н. И. Рычков [и др.] // Оптимизация параметров поливной техники : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 7. – С. 3–12.

103. *Овчаров, В. А.* Качественные показатели дождя машины «Волжанка» / В. А. Овчаров // Вопросы орошения в Поволжье : сб. науч. тр. / ВолжНИИГиМ. – М., 1980. – С. 107–114.

104. *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.

105. *Ожередов, Н. И.* Потери воды на испарение при поливе ДМ «Кубань» / Н. И. Ожередов // Экономия энергозатрат и повышение экологической безопасности полива: сб. науч. тр. / СтавНИИГиМ. – Ставрополь, 1994. – С. 33–37.

106. *Ольгаренко, Г. В.* Концепция повышения экологической безопасности оросительных систем / Г. В. Ольгаренко // Ресурсосберегающие экологически безопасные системы орошения и сельхозводоснабжения : сб. науч. тр. / ВНИИ «Радуга». – Коломна, 2002. – С. 3–6.

107. *Ольгаренко, Г. В.* Нормирование, информационное обеспечение и реализация водосберегающих процессов орошения : автореф. дис. ... д-ра с.-х. наук / Ольгаренко Геннадий Владимирович. – Новочеркасск, 1998. – 52 с.

108. *Ольгаренко, Г. В.* Экономическая оценка широкозахватных дождеваль-ных машин / Г. В. Ольгаренко // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования. – М., 2007. – Т. 2. – С. 384–395.

109. *Орлова, О. К.* Зависимость качества дождя от мезо- и микрорельефа поля и климатических факторов / О. К. Орлова // Орошение сельскохозяйственных культур в Нижнем Поволжье : сб. науч. тр. / Волгоградский СХИ. – Волгоград, 1978. – С. 132–137.

110. *Орлова, О. К.* Проектная стоимость орошения сельскохозяйственных культур в основных природно-мелиоративных районах области / О. К. Орлова // Агротехническая и технико-эксплуатационная оценка способов полива сельскохозяйственных культур в Поволжье : материалы обл. науч.-техн. конф. – Волгоград, 1974. – С. 135–141.

111. ОСТ 70.11.1–74 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Программа и методика испытаний / Всесоюзное объединение «Сельхозтехника». – М., 1977. – 70 с.

112. *Павловский, Д. С.* Исследование и совершенствование методов испытаний дождевальных машин : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Павловский Д. С. – М., 1971. – 19 с.

113. *Пажи, Д. Г.* Распыливатели жидкости / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М. : Химия, 1979. – 216 с.

114. Пат. 2006113914 Российская Федерация, А О1 G 25/09. Дождевальная машина / Слюсаренко В. В. [и др.] ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «Саратов. ГАУ». – № 2006113914/12 ; заявл. 24.04.06 ; опубл. 20.11.07, Бюл. № 30. – 5 с. : ил.

115. *Петров, Е. Г.* Опыт по дождеванию хлопчатника в 1933 г. / Е. Г. Петров, П. К. Дорошенко // Дождевание. – 1936. – Т. 11. – С. 35–41.

116. *Пикалов, Ф. И.* Гидравлика дальнеструйного дождевального аппарата / Ф. И. Пикалов // Дождевание. – 1937. – Т. 2. – С. 42–48.

117. *Полонский, А. М.* Исследование гидравлических параметров широкозахватной дождевальной техники / А. М. Полонский // Широкозахватные дождевальные машины «Фрегат» и «Волжанка» : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 5. – С. 29–59.

118. *Полонский, А. М.* Методика подбора дождевальных аппаратов машины «Фрегат» / А. М. Полонский, С. Н. Никулин. – Коломна, 1972. – 11 с.

119. *Поляков, Ю. П.* Прогноз эрозии почв и обоснование ресурсосберегающей технологии при поливе : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Поляков Юрий Павлович. – М., 1990. – 40 с.

120. *Попов, В. Г.* Ирригационная эрозия и ее предупреждение при орошении дождеванием на темно-каштановых почвах Заволжья : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Попов В. Г. – Саратов, 1990. – 17 с.

121. *Поспелов, А. М.* Дождевание / А. М. Поспелов. – М. : Сельхозиздат, 1962. – 61 с.

122. *Поспелов, А. М.* Структура дождя при искусственном дождевании сельскохозяйственных культур / А. М. Поспелов // Дождевание : сб. науч. тр. / ВНИИ-ГиМ. – М., 1940. – Т. 1. – С. 53–57.

123. *Просветов, Ю. С.* Влияние изменения давления в сети на показатели работы ДМ «Фрегат» / Ю. С. Просветов // Гидротехника и мелиорация.– 1983. – № 3. – С. 44–46.

124. *Просветов, Ю. С.* Влияние характеристик дождя, создаваемого широкозахватными дождевальными машинами, на условия произрастания сельскохозяйственных культур : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Просветов Юрий Сергеевич. – Новочеркасск, 1982. – 22 с.

125. *Пунинский, Ю. С.* Результаты испытаний дождевальных машин «Фрегат» в условиях лесостепной черноземной зоны / Ю. С. Пунинский, В. К. Губер // Совершенствование способов и техники полива сельскохозяйственных культур в Поволжье : сб. науч. тр. / ВолжНИИГиМ. – М., 1973. – С. 51–58.

126. Распыливание жидкости / Ю. П. Детяткин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1976. – 168 с.

127. Расчет на ЭВМ линейных размеров и энергетических характеристик дождя / В. И. Городничев [и др.] // Новое в технике и технологии полива : сб. науч. тр. / ВНПО «Радуга». – М., 1979. – Вып. 12. – С. 104–113.

128. *Рачинский, А. А.* Потери воды в воздухе при поливе дождеванием / А. А. Рачинский, В. К. Севрюгин // Гидротехника и мелиорация. – 1984. – № 11. – С. 42–45.

129. Руководство по определению экономической эффективности новой поливной техники ВТР-0–4–81. – Коломна, 1981. – 267 с.

130. *Рыжко, Н. Ф.* Влияние равномерности полива дождевальными машинами «Фрегат» на урожайность сельскохозяйственных культур / Н. Ф. Рыжко // Научно-технический прогресс в мелиорации земель Поволжья : сб. науч. тр. ВолжНИИГиМ / ВНИИГиМ. – М., 1990. – С. 160–167.

131. *Рыжко, Н. Ф.* Рекомендации по настройке дождевальных аппаратов машин «Фрегат». / Н. Ф. Рыжко, Т. Н. Озерская, Н. В. Рыжко. – Саратов : Главсредволговодстрой, 1989. – 46 с.

132. *Рыжко, Н. Ф.* Совершенствование технических средств и технологии орошения в Поволжье / Н. Ф. Рыжко : монография. – Саратов : Саратовский источник, 2007. – 110 с.

133. *Рыжко Н.Ф.* Совершенствование дождеобразующих устройств для многопорных дождевальных машин // Н.Ф. Рыжко: монография. – Саратов,: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ». 2009. – 176 с.
134. *Рязанцев, А. И.* Механизация полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия в сложных условиях / А. И. Рязанцев. – Рязань, 1991. – 131 с.
135. *Рязанцев, А. И.* Оптимизация широкозахватных дождевальных машин кругового действия для сложных почвенно-рельефных условий / А. И. Рязанцев, О. А. Гаврилица. – Кишинев, 1991. – 150 с.
136. *Сапунков, А. П.* Механизация полива дождеванием / А. П. Сапунков. – М. : Колос, 1984.– 271 с.
137. *Соломин, И. А.* Поправка на поливную норму при орошении дождеванием / И. А. Соломин, А. М. Абрамов // Рациональное использование водных ресурсов : метод. вопросы и инженерные мероприятия при использовании поверхностных и подземных вод. – М., 1985. – Вып. 2.
138. *Соломон, К. Х.* Лазерно-оптическое измерение размеров капель при дождевании / К. Х. Соломон // Мелиорация и водное хозяйство. – 1992. – № 5, 6. – С. 45–48.
139. Справочник по механизации орошения / Б. Г. Штепа [и др.]. – М. : Колос, 1979. – 303 с.
140. *Степанов, П. М.* Справочник по гидравлике для мелиораторов / П. М. Степанов, И. Х. Овчаренко, Ю. А. Скобельцын. – М. : Колос, 1984. – 207 с.
141. СТО АИСТ 001–2010. Агротехническая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2013. – 60 с.
142. СТО АИСТ 11.1–2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2012. – 54 с.
143. СТО АИСТ 003–2010. Экономическая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2013. – 7 с.

144. *Стрельников, В. И.* Номограмма для определения потерь воды на испарение при дождевании / В. И. Стрельников, В. А. Добрянский // Гидротехника и мелиорация. – 1978. – № 8. – С. 83–84.

145. *Строгий, В. М.* Обоснование параметров и исследование элементов фронтальных многоопорных дождевальных машин с электроприводом : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Строгий В. М. – Ставрополь, 1982. – 20 с.

146. Техника и технология безопасного применения средств защиты растений / Ж. Р. Дидио [и др.]. – М. : Агропромиздат, 1991. – 186 с.

147. Техника полива сельскохозяйственных культур / В. Я. Чичасов [и др.]. – М. : Колос, 1970. – 267 с.

148. Технологические и технические средства полива : рекомендации / Ф. К. Абдразаков [и др.] ; Саратов. ГАУ им. Н. И. Вавилова. – Саратов, 2001. – 100 с.

149. *Федоренко, И. Д.* О структуре искусственного дождя / И. Д. Федоренко // Труды института гидротехники и мелиорации. – М., 1936. – Т. 18. – С. 107–123.

150. *Федоренко, И. Д.* Об испарении воды при дождевании и зависимость его от диаметра капель дождя // Труды ВНИИГиМ. – М., 1938. – Т. 22. – С. 68–78.

151. *Фокин, Б. П.* Повышение эффективности полива многоопорными дождевальными машинами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Фокин Борис Павлович. – Ставрополь, 2002. – 52 с.

152. *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.

153. *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.

154. *Хабаров, В. Е.* Потери оросительной воды на испарение и снос ветром при поливе ДМ «Волжанка» / В. Е. Хабаров, Ю. Г. Кузнецов // Пути повышения интенсивности орошаемого земледелия : сб. науч. тр. / ЮжНИИГиМ. – Новочеркасск, 1979. – Вып. 37. – С. 68–75.

155. *Хан, Г.* Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапира. – М. : Мир, 1969. – 178 с.

156. *Ханзафаров, В. В.* Особенности элементов техники полива дальнеструйной машиной фронтального действия ДДФ-100 : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Ханзафаров Владимир Валерьевич. – Новочеркасск, 1985. – 21 с.

157. *Чижиков, Г. И.* Исследование процесса непрерывного и прерывистого дождевания : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Чижиков Геннадий Иванович. – Волгоград, 1970. – 26 с.

158. *Чичасов, В. Я.* К вопросу о потерях воды на испарение при дождевании / В. Я. Чичасов, В. Н. Черноморцева // Современные оросительные системы и пути их совершенствования : сб. науч. тр. – М., 1975. – Вып.1. – С. 78–84.

159. *Швебс, Г. И.* Формирование водной эрозии стока, наносов и их оценка / Г. И. Швебс. – Л. : Гидрометиздат, 1974. – 184 с.

160. *Шевелев, Ф. А.* Таблицы для гидравлических расчетов водопроводящих труб / Ф. А. Шевелев, А. Ф. Шевелев. – М. : Стройиздат, 1984. – 120 с.

161. *Шевцов, Н. М.* Изменение водно-физических свойств некоторых почв Заволжья при орошении дождеванием : автореф. дис. ... канд. биол. наук / Шевцов Николай Михайлович. – М, 1972. – 20 с.

162. *Шевцов, Н. М.* Расчет эксплуатационных параметров дождя с использованием ЭВМ на основе оценки физических свойств почв / Н. М. Шевцов // Оптимизация параметров поливной техники : сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 7. – С. 158–166.

163. *Штангей, А. И.* Испарение воды в процессе дождевания капель при поливе дождевальной установкой ДДА-100 М / А. И. Штангей // Метеорология и гидрология. – 1975. – № 11. – С. 100–105.

164. *Штангей, А. И.* Испарение воды с дождевального облака при поливе машиной «Фрегат» / А. И. Штангей // Метеорология и гидрология.– 1977. – № 10. – С. 72–76.

165. *Штангей, А. И.* Исследование потерь и распределения воды в процессе дождевания : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Штангей Анатолий Иванович. – Киев, 1977. – 20 с.

166. *Щедрин, В. Н.* Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин. – М. : Росиформагротех, 2005. – 388 с.

167. *Эйлер, Т.* Распределение дождя дождевального аппарата / Т. Эйлер // Дождевание. – 1934. – Т. 1. – С. 121–136.

168. Этапы создания и модернизации комплексов технологического оборудования оросительных систем / Г. В. Ольгаренко [и др.] // Ресурсосберегающие экологически безопасные системы орошения и сельхозводоснабжения : сб. науч. тр. / ВНИИ «Радуга». – Коломна, 2002. – С. 7–23.

169. *Alexandresen, O.* Методика расчета конструктивных параметров дождевальных установок. *Hidrotechika* 1983.18.3. 128-135. П. 30413 / O. Alexandresen // Мелиорация. – 1973. – № 12.

170. *Черпало, А.* Схеми на расположение и равномерност на дъжда в тихо время при струйни дъждевани апарати / А. Черпало // Научни трудове на ИХ и М. – 1968. – Т. X.

171. Etudes sur l'irrigation par aspersion en rigion sahclienne (Tillabery – Republique du Niger) – *Argon trop.* 1973, 28, 9; 901 – 915.

172. *Frast, K. P.* Sprinkler evaporation losges / K. P. Frast, H.G. Schwalen // *Agricultural Engineering.* – 1955. – № 36.

173. *Fukui, J.* Оценка равномерности распределения поливной воды при дождевании / J. Fukui // *Jrrigat Sc.* – 1980. – № 2.

174. *Hummel, H. G.* Niderschlagsverteilung von Regnet mit geradliniger oder kreisforming kontinuierlicher Vorw artbtwegnen / H. G. Hummel // *Agrartechnik.* – 1975. – № 10.

175. *Куюмджиев, X.* Определяне на равномерности на разпределениета на дъжда при работе на дъждовальни апарати с помощта на цифрова електронноизчислителна машина / X. Куюмджиев, М. Васильева // *Селскостопаска техника.* – 1973. – № 3.

176. *Lateska, M.* Использование ЭВМ для оценки равномерности полива дождеванием / M. Lateska, J. Окепка. – 1975. 21.9. *Polnohospodarstvo, ЧССР.*

177. *Masek, V.* Optimalne parametry zraszacry z punkty widrienia hudrauliri i konstrukcji – *Maszyny i cicniki* / V. Masek // *POLNICZE.* – 1977. – № 2.

178. *Mirschel, W.* Model zur bestimmung, des mittleren Tropfendurchmess entlang dem Wurfradius bei Drehstabregnen / *W. Mirschel // Arch, Acker u Pflanzenbau und Badencol.* – Berlin, 1984. – С. 313–321.

179. *Okamura, S.* Pozdeleni velikosti vodnich kapek v paprsku z postřikavače / *S. Okamura // Vodni hospodaritvi.* – 1970. – № 8.

180. *Okamura, S.* Teoreticka studie o vodnim paprskuz postřikavače v podminkačh bezvětri / *S. Okamura // Vodni hospodaritvi.* – 1970. – № 7.

181. *Okamura, S.* Teoreticka studie o pohybu vadniho paprsku z postřikavače pri rusobeni větri / *S. Okamura // Vodni hospodaritvi.* – 1970. – № 8.

182. *Райков, Р.* Определение поперечного распределения дождя при дождевании в сочетании с прямолинейным равномерным движением / *Р. Райков // Селскостопанска техника.* – 1972. – № 5.

183. *Schafer, W.* Wasserverluste durh Verdaenstung Wahrend der Beregnung – Arch. Aker / *W. Schafer, K. Koitzsch // u Pflannenban und Bodenkd.* – 1974. – 18. – 12 : 881–886.

184. *Solomon K.* Применение алгоритма для описания схем распределения дождя / *K. Solomon, S. Berdek // Trans ASAE 11980. 23. 4.146941 B Charaterizing Sprinler Distribution patterns with a clastering Algoritm.*

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 1 – Величина испарения и сноса дождя при поливе дождевальными аппаратами, насадками и машинами

$D-d$, мм	P , МПа	q , л/с	h_n , м	d_c , мм	ρ_c , мм/мин	ρ_m , мм/мин	$n + 1$, об/мин	α , град	T , град	ϕ , %	v_v , м/с	$E_{и.у}$, %
Полив одиночным дождевальным аппаратом ДМ «Фрегат» и машиной ДДН-70												
4,8	0,36	0,46	6,0	1,05	0,053	1,635	1,31	–	30,0	20	3,4	35,0
11,9–5,6	0,19	2,54	5,3	–	0,260	2,70	2,0	–	18,0	22	3,6	36,5
9,5–5,6	0,22	1,92	5,5	2,20	0,289	2,640	1,35	–	13,0	87	3,3	5,0
11,1–5,6	0,28	2,76	6,1	1,98	0,169	2,810	2,44	–	10,0	90	2,5	2,4
10,3–5,6	0,38	2,86	7,5	1,50	0,450	2,230	2,0	–	27,6	38	0,9	20,4
9,5–5,6	0,55	3,32	8,1	1,11	0,410	2,220	2,0	–	27,6	38	0,9	30,1
3,2	0,56	0,27	5,9	0,60	0,074	1,534	4,0	–	27,6	38	0,9	30,8
55–16	0,60	72,0	17,5	2,50	0,432	8,450	1,14	–	23,0	35	1,5	10,7
Полив ДМ «Фрегат», на пролетах установлены дождевальные аппараты												
10,3–5,6	0,38	2,86	7,5	1,50	0,450	2,230	2,0	90	27,0	40	2,90	10,20
9,5–5,6	0,55	3,88	8,1	1,11	0,410	0,220	2,0	90	27,0	40	2,88	16,20
3,2	0,17	0,137	4,3	1,28	0,046	1,506	–	90	27,0	40	2,88	15,0
9,5–5,6	0,24	2,0	5,8	1,94	0,370	2,645	1,5	90	27,0	40	2,88	13,80
8,7–5,6	0,23	1,74	5,5	1,92	0,370	2,452	1,5	90	27,0	40	2,88	16,60
7,9–5,6	0,36	1,89	6,6	1,30	0,284	1,975	–	15	18,8	73	5,30	15,90
4,3–3,9	0,24	0,55	5,0	1,17	0,139	1,645	2,75	15	18,8	73	5,30	7,0
3,6	0,43	0,28	6,0	0,75	0,071	1,459	–	90	21,4	69	4,0	30,60
7,1–4,8	0,35	1,55	6,3	1,24	0,243	1,710	–	90	21,4	69	4,0	11,10
10,3–5,6	0,43	2,72	7,8	1,370	0,420	1,926	1,7	45	21,0	26	1,30	9,16
9,5–5,6	0,45	2,95	7,8	1,247	0,445	2,197	1,5	45	23,7	22,5	1,59	13,17
10,3–5,6	0,43	2,72	7,8	1,370	0,420	1,926	1,7	45	23,7	22,5	1,59	12,10
9,5–5,6	0,25	2,17	5,8	1,910	0,450	2,678	1,5	45	26,0	18	2,70	10,90
9,5–5,6	0,24	2,10	5,8	1,940	0,362	2,645	2,0	10	29,0	20	3,0	4,60
9,5–5,6	0,24	2,0	5,8	1,940	0,371	2,645	1,5	45	30,0	20	3,0	7,50
9,5–5,6	0,28	2,17	6,0	1,735	0,445	2,015	2,0	10	30,5	20	4,50	8,10
9,5–5,6	0,28	2,17	6,0	1,735	0,445	2,015	2,0	10	25,0	20	3,10	3,80

Примечание. $D-d$ – диаметры основной и дополнительной насадки; P – давление на выходе струи; q – расход воды; h_n – средняя высота подъема струи над полем; d_c – средний диаметр капель дождя; ρ_c , ρ_m – средняя и мгновенная интенсивность дождя; n – частота вращения аппарата; α – угол между направлением ветра и трубопроводом машины; t , ϕ – температура и относительная влажность воздуха; v_v – скорость ветра; $E_{и.у}$ – величина испарения и сноса дождя.

Таблица 2 – Величина испарения и уноса дождя при поливе дождевальными аппаратами

№	$D-D_d$, мм	P , МПа	q , л/с	ρ , мм/мин	P/D	t , град	φ , %	v_b , м/с	$E_{и.у}$, %
По данным П.К. Дороженко									
1	20–9	0,350	9,30	0,184	2,11	25,6	64,3	2,70	23,8
2	20–9	0,400	9,98	0,165	2,41	29,6	69,1	0,30	16,6
3	20–9	0,350	9,30	0,151	2,11	27,4	56,6	1,50	18,3
4	20–9	0,335	9,03	0,164	1,98	28,4	60,7	3,00	21,6
5	20–9	0,350	9,03	0,174	2,11	24,8	61,0	2,40	25,2
6	20–9	0,400	9,90	0,157	2,41	19,7	51,4	1,00	16,7
7	20–9	0,400	9,90	0,149	2,41	21,9	56,1	0,15	15,4
8	20–9	0,400	9,90	0,166	2,41	28,6	65,4	0,50	16,9
9	20–9	0,400	9,90	0,159	2,41	24,3	48,8	0,10	14,7
10	20–9	0,350	9,30	0,157	2,41	31,2	70,6	1,90	21,3
11	20–9	0,450	10,50	0,138	2,71	19,8	48,3	0	14,1
По данным К.М. Мустафаевой									
12	12–7	–	–	–	–	19,0	94,4	1,06	4,0
13	12–7	–	–	–	–	22,0	75,5	1,10	14,0
14	12–7	–	–	–	–	29,4	50,2	2,70	19,0
15	12–7	–	–	–	–	29,3	49,7	3,18	17,0
16	12–7	–	–	–	–	23,0	74,7	1,95	12,0

Примечание. Условные обозначения см. таблицу 1.

Таблица 2 – Величина испарения и уноса дождя при поливе дождевальными насадками и аппаратами (по данным А.П. Клепальского)

$D-d$, мм	P , МПа	q , л/с	$n + 1$, об/мин	$h_{п1}$, м	$h_{п2}$, м	R , м	d_c , мм	ρ_c , мм/мин	ρ_m , мм/мин	α , град	t , град	φ , %	v_b , м/с	Φ	$E_{и.у.}$, %
Дождевательные насадки установки АДП-350															
7,0	0,2	0,65	1	3	3,5	6	0,7	0,65	0,38	90	28,8	76	5,7	46,3	49,2
7,0	0,2	0,65	1	3	3,5	6	0,7	0,65	0,38	45	23,1	55	6,0	72,7	38,4
7,0	0,2	0,65	1	3	3,5	6	0,7	0,65	0,38	20	17,4	72	2,3	20,9	29,8
7,0	0,2	0,65	1	3	3,5	6	0,7	0,65	0,38	45	28,8	76	2,6	31,7	25,8
7,0	0,2	0,65	1	3	3,5	6	0,7	0,65	0,38	0	22,6	66	0	7,6	19,0
7,0	0,2	0,65	1	3	3,5	6	0,7	0,65	0,38	0	20,3	78	0	4,4	6,4
Дождевательные аппараты установки ДКШ-64															
7,1	0,39	0,95	4,2	1,2	5,5	18	1,22	0,09	1,43	20	28,5	49	5,65	96,6	29,7
7,1	0,39	0,95	4,2	1,2	5,5	18	1,22	0,10	1,43	70	15,5	74	5,70	27,6	26,2
7,1	0,39	0,95	4,2	1,2	5,5	18	1,22	0,08	1,43	10	21,7	48	3,20	47,3	37,7
7,1	0,39	0,95	4,2	1,2	5,5	18	1,22	0,083	1,43	10	18,8	72	6,65	8,6	10,2
7,1	0,39	0,95	4,2	1,2	5,5	18	1,22	0,12	1,43	20	18,5	77	3,0	17,6	14,7
7,1	0,39	0,95	4,2	1,2	5,5	18	1,22	0,11	1,43	70	20,3	78	0,5	6,7	7,8

Примечание. Условные обозначения см. таблицу 1.

Таблица 4 – Величина испарения и уноса дождя при поливе дефлекторными насадками, среднеструйными и дальнеструйными дождевальными аппаратами (по данным В.А. Анисимова и М.С. Мансурова)

Тип дождевателя	t , град	v_b , м/с	φ , %	Φ	$E_{и.у}$, %
Короткоструйные насадки (типа КДУ)	29,3	1,9	39	51,8	15,5
	29,6	1,9	49	43,7	15,3
	30,2	2,0	52	43,5	15,5
	26,9	1,6	56	30,7	15,2
Среднеструйные аппараты (ХКЗ-4) $D-D_d = 12-7$ мм	30,1	1,3	35	50,8	17,5
	30,9	1,5	37	48,8	18,1
	35,7	3,8	27	125,0	23,0
	23,5	1,7	55	35,8	18,0
	30,8	2,2	47	52,2	20,0
Дальнеструйные аппараты (ДН-1) $D = 32$ мм $H = 50$ м	30,3	1,4	45	40,0	17,2
	29,2	1,3	57	28,8	13,2
	29,3	1,9	54	39,0	18,7
	32,8	3,2	25	101,7	24,1
	29,5	2,7	54	50,2	21,3
	29,0	2,5	41	59,8	20,4
	26,8	2,1	56	36,5	17,3
	28,1	2,2	48	46,7	19,4
	26,4	1,8	54	34,0	16,9
Дальнеструйные аппараты (ДН-1)	27,2	1,1	44	31,98	14,5
	26,4	1,4	50	31,68	15,8
	29,2	1,8	57	35,15	18,2
	28,3	2,9	48	57,39	21,6
	26,0	3,0	45	57,20	23,3
Короткоструйные насадки	30,6	1,1	40	40,32	13,7
	28,8	1,3	50	33,12	13,9
	29,5	1,4	46	38,23	14,2
	28,5	1,5	45	39,18	14,4
	27,4	1,6	45	39,18	15,9
	27,4	1,9	50	39,74	15,1
	26,7	1,9	48	40,26	17,1
	27,6	2,1	60	34,22	16,7
	25,1	2,3	45	45,55	16,7
28,5	3,1	47	61,93	20,7	

Среднегодовое (суточные) климатические показатели
за вегетационный период (В.А. Овчаров, 1982)

Область, республика	T , град	ϕ , %	v_v , м/с	Область, республика	T , град	ϕ , %	v_v , м/с
Куйбышевская	16,2/18,0	61,0/58,0	3,4/3,4	Астраханская	19,7/21,9	55,4/53	4,5/4,4
Саратовская	17,4/19,4	59,0/56,0	3,8/3,7	Калмыкия	19,1/21,5	55,0/53	4,5/4,4
Волгоградская	18,7/20,8	55,0/52,0	3,8/3,8	–	–	55,4/53	4,5/4,4

Примечание. Числитель – показатель в вегетационный период, знаменатель – показатель в критический период. Скорость ветра приведена к скорости на высоте 2 м (высота установки флюгера) по зависимости $v_v = 0,7 \cdot v_\phi$. Вегетационный период исчисляется с апреля по октябрь включительно.

Таблица 1 – Полива дождевальной насадки R (по створу «а») в зависимости от диаметра сопла D и давления перед насадкой P при высоте установки 2,0 м

Диаметр, D , мм	Давление P , МПа	Радиус R , м	$100 \cdot P/D$ (x)	$100 \cdot P/D$ (y)	$x \cdot y$	x^2	Радиус расчетный, R_p , м
4	0,10	4,3	2,325	2,5	5,813953	6,25	3,40
4	0,20	4,5	4,44	5	22,22222	25	4,16
4	0,30	4,8	6,25	7,5	46,875	56,25	4,49
6	0,10	4,7	2,12	1,66	3,546099	2,777778	4,31
6	0,20	5	4	3,33	13,33333	11,11111	5,61
6	0,30	5,8	5,17	5	25,86207	25	6,24
7	0,10	5,1	1,96	1,42	2,80112	2,040816	4,67
7	0,20	6	3,33	2,85	9,52381	8,163265	6,24
7	0,30	6,6	4,54	4,28	19,48052	18,36735	7,02
8	0,10	5,2	1,92	1,25	2,403846	1,5625	4,98
8	0,20	6,5	3,07	2,5	7,692308	6,25	6,80
8	0,30	7,1	4,22	3,75	15,84507	14,0625	7,75
10	0,10	6	1,66	1	1,666667	1	5,49
10	0,20	7,6	2,63	2	5,263158	4	7,79
10	0,30	8,4	3,57	3	10,71429	9	9,06
–	–	Σ	51,2547	47,07143	193,0435	190,8353	–

Расчет параметров a и b в уравнения регрессии:

$$a = \frac{\sum Y \cdot \sum X^2 - \sum X \cdot \sum X \cdot Y}{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{47,07 \cdot 190,83 - 51,25 \cdot 193,04}{16 \cdot 190,83 - 51,52^2} = \frac{694,375}{646,8104} = 1,073;$$

$$b = \frac{n \cdot \sum X \cdot Y - \sum X \cdot \sum Y}{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{16 \cdot 193,04 - 51,25 \cdot 47,07}{16 \cdot 190,83 - 51,52^2} = \frac{483,0201}{646,8104} = 0,746.$$

Уравнение для расчета величины радиуса захвата дождем дефлекторной на-

садки, имеет вид:

$$R = \frac{P}{(1,073 + 0,746 P/D)}.$$

Коэффициент детерминации равен:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (R_{\phi_i} - R_{p_i})^2}{\sum (R_{\phi_i} - R_{cp})^2} = 1 - \frac{3,44}{20,516} = 0,832.$$

Расчет уравнения минимального диаметра капель в начале радиуса захвата дождевальной насадки. По данным, приведенным, в таблице приложения Г вычисляем коэффициенты регрессии:

$$r_{12} = 1/N \cdot \Sigma t_1 t_2 = 3,500/8 = 0,4375$$

$$r_{01} = 1/N \cdot \Sigma t_0 t_1 = 5,634185/8 = 0,70427$$

$$r_{02} = 1/N \cdot \Sigma t_0 t_2 = -0,3326/8 = -0,041575$$

Составляем систему нормального уравнения:

$$\beta_1 + 0,4375 \cdot \beta_2 = 0,70427$$

$$0,4375 \cdot \beta_1 + \beta_2 = -0,0415$$

Вычисляем определители Δ , Δ_1 , Δ_2 :

$\Delta =$	1	0,4375	$= 1 - 0,19141 = 0,80859$
	0,4375	1	
$\Delta_1 =$	0,70427	0,4375	$= -0,70427 + 0,01818 = 0,72245$
	-0,0415	1	
$\Delta_2 =$	1	0,70427	$= -0,0415 - 0,30811 = -0,349618$
	0,4375	-0,0415	

Таким образом:

$$\beta_1 = \Delta_1/\Delta = -0,72245/0,80859 = 0,8934688,$$

$$\beta_2 = \Delta_2/\Delta = -0,349618/0,80859 = -0,4323.$$

Переходя к натуральному масштабу, получим:

$$a_1 = \beta_1 \sigma / \sigma_1 = 0,8934688 \cdot 0,13436 / 0,169 = 0,709955;$$

$$a_2 = \beta_2 \sigma / \sigma_2 = -0,4323 \cdot 0,134359 / 0,2732 = -0,2125269;$$

$$a_0 = Y - a_1 X_1 - a_2 X_2 = 0,411774 - 0,96102 \cdot 0,709955 + \\ + 0,2125269 \cdot 1,297882 = 0,0055272.$$

Уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$\log(100d) = 0,005527 + 0,7099 \log D - 0,2125 \log P;$$

$$\log(100d) = 1,01 \log(100d) + 0,7099 \log D - 0,2125 \log P;$$

$$d = 0,01 D^{0,7099} \cdot H^{-0,2125};$$

Коэффициент множественной регрессии имеет значение:

$$R_{y,x,x} = \sqrt{(r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01} \cdot r_{02} \cdot r_{12}) / (1 - r_{12}^2)} = \\ = \sqrt{(0,704^2 + 0,041^2 + 2(0,704) \cdot (-0,041) \cdot 0,437) / (1 - 0,437^2)} = 0,803.$$

Таблица 1 – Расчет минимального диаметра капель дождя в начале радиуса захвата дождевальной насадки

$(100d)$, мм	$D_{н.}$, мм	H , м	$y = \log$ $(100d)$	$X_1 =$ $\log D$	$X_2 =$ $\log H$	$y - \bar{y}$	$X_2 - \bar{X}_2$	$(Y_1 -$ $-\bar{Y}_1)^2$	$(X_1 -$ $-\bar{X}_1)^2$	$(X_2 -$ $-\bar{X}_2)^2$	$t_1 = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_1}$	$t_2 = \frac{X_2 - \bar{X}_2}{\sigma_2}$	$t_0 = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_0}$	$t_1 \cdot t_2$	$t_1 \cdot t_0$	$t_2 \cdot t_0$
2,5	6	8,0	0,397	0,778	0,903	-0,013	-0,395	0,182	0,03348	0,1560	-1,082	-1,444	-0,102	1,562	0,111	0,148
2,0	6	14,0	0,301	0,778	1,146	0,110	-0,152	0,182	0,03348	0,0231	-1,082	-0,555	-0,824	0,600	0,891	0,457
1,5	6	32,6	0,176	0,778	1,513	0,235	0,215	0,182	0,03348	0,0462	-1,082	0,787	-1,754	-0,852	1,897	-1,382
2,5	8	19,5	0,397	0,903	1,290	0,013	-0,008	0,057	0,00336	0,0000	-0,343	-0,029	-0,102	0,009	0,035	0,002
3,5	12	13,0	0,544	1,079	1,113	-0,132	-0,184	0,118	0,01392	0,0338	0,698	-0,673	0,984	-0,470	0,688	-0,662
2,5	12	58,0	0,397	1,079	1,763	0,013	0,465	0,118	0,01392	0,2162	0,698	1,703	-0,102	1,199	-0,071	-0,175
4,0	14	15,0	0,02	1,146	1,176	-0,190	-0,122	0,185	0,03422	0,0148	1,095	-0,677	1,416	0,741	1,550	0,952
3	14	30,0	0,477	1,146	1,477	-0,065	0,179	0,185	0,03422	0,032	1,095	0,655	-0,486	0,717	0,532	0,318
		Σ	3,294	7,687	10,382	-	Σ	0,44938	0,20008	0,5223	-	-	Σ	3,500	5,634	-0,332
		x	0,411	0,961	1,298	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		σ	0,134	0,169	0,273	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. Σ – сумма значений; x – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение

Расчет уравнения максимального диаметра капель дождя в конце радиуса захвата дефлекторной насадки. По данным, приведенным в таблице 1 приложения Д, вычисляем коэффициенты регрессии:

$$r_{12} = 1/N \cdot \Sigma t_1 t_2 = 3,7204/14 = 0,265;$$

$$r_{01} = 1/N \cdot \Sigma t_0 t_1 = 7,2448/14 = 0,517;$$

$$r_{02} = 1/N \cdot \Sigma t_0 t_2 = -6,5082/14 = -0,464.$$

Составляем систему нормального уравнения:

$$\beta_1 + 0,265 \cdot \beta_2 = 0,517;$$

$$0,265 \cdot \beta_1 + \beta_2 = -0,464.$$

Вычисляем определители Δ , Δ_1 , Δ_2 :

$\Delta =$	1	0,265	$= 1 - 0,063 = 0,927;$
	0,265	1	
$\Delta_1 =$	0,517	0,265	$= 0,517 + 0,1376 = 0,641;$
	-0,464	1	
$\Delta_2 =$	1	0,43	$= 0,5357 - 0,1111 = -0,6024.$
	0,25	-0,53	

Таким образом: $\beta_1 = \Delta_1/\Delta = 0,641/0,927 = 0,68974;$

$$\beta_2 = \Delta_2/\Delta = -0,6024/0,927 = -0,64874.$$

Переходя к натуральному масштабу, получим:

$$a_1 = \beta_1 \sigma / \sigma_1 = 0,68974 \cdot 0,101 / 0,157 = 0,447772;$$

$$a_2 = \beta_2 \sigma / \sigma_2 = -0,64874 \cdot 0,101 / 0,242 = -0,27231;$$

$$a_0 = Y - a_1 X_1 - a_2 X_2 = 0,239 - 0,4477 \cdot 0,998 + 0,2723 \cdot 1,286 = 0,14227.$$

Уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$\log d = 0,142279 + 0,44772 \log D - 0,272 \log H;$$

$$\log d = 1,3874 \log d + 0,491 \log D - 0,359 \log P;$$

$$d = 1,3874 D^{0,4477} H^{-0,2723}.$$

Коэффициент множественной регрессии имеет значение:

$$R_{y,x,x} = \sqrt{(r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01} \cdot r_{02} \cdot r_{12}) / (1 - r_{12}^2)} =$$

$$= \sqrt{(0,517^2 + 0,464^2 + 2 \cdot 0,517 \cdot (-0,464) \cdot 0,265) / (1 - 0,265^2)} = 0,809.$$

Таблица 1 – Расчет максимального диаметра капель дождя в конце радиуса захвата дефлектора насадки

d_{\max} , мм	D , мм	H , м	$\log d$	$\log D$	$\lg H$	$y - \bar{y}$	$X_1 - \bar{X}_1$	$X_2 - \bar{X}_2$	$(y_1 - \bar{y}_1)^2$	$(X_1 - \bar{X}_1)^2$	$(X_2 - \bar{X}_2)^2$	$t_1 = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_1}$	$t_2 = \frac{X_2 - \bar{X}_2}{\sigma_2}$	$t_0 = \frac{y - \bar{y}}{\sigma_0}$	$t_1 \cdot t_2$	$t_1 \cdot t_0$	$t_2 \cdot t_0$
1,90	6	8,0	0,278	0,778	0,903	0,039	-0,220	-0,383	0,001	0,048	0,146	-1,404	-1,579	0,388	2,217	-0,545	-0,612
1,50	6	14,0	0,176	0,778	1,146	-0,063	-0,220	-0,141	0,003	0,048	0,019	-1,404	-0,577	0,618	0,811	0,868	0,357
1,25	6	32,6	0,096	0,778	1,531	-0,142	-0,220	0,226	0,020	0,048	0,051	-1,404	0,934	-1,395	-1,312	1,959	-1,304
1,75	8	7,5	0,342	0,903	0,875	0,003	-0,095	-0,411	1,49E	0,009	0,169	-0,608	-1,694	0,037	1,031	-0,023	-0,064
1,35	8	19,5	0,243	0,903	1,290	-0,108	-0,095	0,003	0,011	0,009	1,37	-0,608	0,015	-1,067	-0,009	0,649	-0,016
1,30	8	28,5	0,130	0,903	1,454	-0,125	-0,095	0,168	0,015	0,009	0,028	-0,608	0,694	-1,228	-0,422	0,747	-0,852
2,20	10	18,0	0,113	1,000	1,255	0,103	0,001	-0,032	0,010	1,7-E	0,000	0,008	-0,127	1,012	0,001	0,008	-0,129
2,20	12	13,0	0,342	1,079	1,113	0,103	0,080	-0,172	0,010	0,006	0,029	0,512	-0,710	1,012	-0,364	0,518	-0,719
1,90	12	28,0	0,342	1,079	1,447	0,039	0,080	0,160	0,001	0,006	0,025	0,512	0,662	0,388	0,339	0,198	0,257
1,25	12	58,0	0,096	1,079	1,763	-0,142	0,080	0,477	0,020	0,006	0,227	0,512	1,965	-1,395	1,007	0,715	-2,743
2,10	14	15,0	0,322	1,146	1,176	0,083	0,147	-0,111	0,006	0,021	0,012	0,9389	-0,454	0,814	-0,426	0,764	-0,369
1,60	14	3,0	0,204	1,146	1,477	-0,035	0,147	0,190	0,001	0,021	0,036	0,938	0,786	-0,343	0,738	0,322	-0,270
2,40	16	16,0	0,380	1,204	1,204	0,141	0,205	-0,082	0,019	0,042	0,006	1,308	-0,338	-1,383	-0,443	1,809	0,468
2,20	16	24,5	0,342	1,204	1,389	0,103	0,205	0,102	0,010	0,042	0,010	1,308 0	0,423	1,012	0,554	1,324	0,429
		Σ	3,348	13,980	18,00	-	-	Σ	0,135	0,320	0,765	-	-	Σ	3,720	7,244	-6,508
		y	0,239	0,998	1,287	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		σ	0,101	0,157	0,242	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Примечание. Σ – сумма значений; x – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение.

Таблица 2 – Расчетные значения диаметра капель дождя вдоль радиуса полива дождевальной насадки

D , мм	P , МПа	d min, мм	d max, мм	$(X_i/R)/d_i$	$(X_i/R)/d_i$	$(X_i/R)/d_i$
6	0,080	0,123	1,781	0,180/0,283	0,440/0,601	0,890/1,481
6	0,140	0,167	1,455	0,180/0,292	0,450/0,550	0,910/1,242
6	0,326	0,264	1,075	0,167/0,336	0,500/0,542	0,833/0,859
8	0,075	0,087	2,098	–	0,400/0,598	0,833/1,564
8	0,195	0,147	1,489	0,130/0,237	0,476/0,577	0,880/1,225
8	0,285	0,180	1,299	–	0,357/0,425	0,880/1,079
10	0,180	0,110	1,709	–	0,400/0,516	0,800/1,210
12	0,130	0,076	2,101	0,130/0,212	0,530/0,828	0,933/1,872
12	0,280	0,117	1,595	–	0,470/0,582	0,823/1,181
12	0,580	0,171	1,228	0,120/0,236	0,529/0,392	0,823/0,932
14	0,150	0,072	2,153	0,120/0,198	0,410/0,616	0,823/1,568
14	0,300	0,102	1,679	0,100/0,180	0,470/0,598	0,840/1,276
16	0,160	0,063	2,246	–	0,392/0,941	0,784/1,518
16	0,245	0,079	1,927	–	–	0,740/1,202

Расчет уравнения γ (β -распределения) эпюры распределения дождя для дождевальной насадки.

По данным, приведенным в таблице 1 приложения Е вычисляем коэффициенты регрессии:

$$r_{12} = 1/N \cdot \sum t_1 t_2 = -3,83753/8 = -0,47969$$

$$r_{01} = 1/N \cdot \sum t_0 t_1 = 3,429924/8 = 0,42874$$

$$r_{02} = 1/N \cdot \sum t_0 t_2 = 1,401029/8 = 0,175129$$

Составляем систему нормального уравнения:

$$B_1 - 0,47969 \cdot \beta_2 = 0,428874$$

$$-0,47969 \cdot \beta_1 + \beta_2 = 0,175129$$

Вычисляем определители Δ , Δ_1 , Δ_2 :

$\Delta =$	1	-0,4796	$= 1 - 0,230203 = 0,769897$
	-0,47969	1	
$\Delta_1 =$	0,428874	-0,4796	$= 0,512748$
	0,175129	1	
$\Delta_2 =$	1	0,428874	$= 0,380791$
	-0,4796	0,175129	

Таким образом:

$$\beta_1 = \Delta_1/\Delta = 0,512748/0,769897 = 0,665996$$

$$\beta_2 = \Delta_2/\Delta = 0,380791/0,769897 = 0,494601$$

Переходя к натуральному масштабу, получим:

$$a_1 = \beta_1 \sigma / \sigma_1 = 0,665996 \cdot 0,31348 / 2,76457 = 0,075519;$$

$$a_2 = \beta_2 \sigma / \sigma_2 = 0,494601 \cdot 0,31348 / 1,78817 = 0,086707;$$

$$a_0 = Y - a_1 X_1 - a_2 X_2 = 3,25125 - 0,075192 \cdot 8,75 + 0,086707 \cdot 1,64855 = 0,705861$$

Уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$\gamma = 0,705861 + 0,075519D + 0,086707/(H/D);$$

Коэффициент множественной регрессии имеет значение:

$$R_{y,x,x} = \sqrt{(r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01} \cdot r_{02} \cdot r_{12}) / (1 - r_{12}^2)} =$$

$$= \sqrt{(0,42874^2 + 0,1751^2 - 2(0,428) \cdot (-0,4796) \cdot 0,437) / (1 - 0,4796^2)} = 0,61.$$

Таблица 1 – Расчет параметра γ (β -распределения) эпюры распределения дождя для дождевальной насадки

X_1 , (D, мм)	X_2 , 1/(H/D)	Y , (γ)	$X_1 - \bar{X}_1$	$X_2 - \bar{X}_2$	$Y - \bar{Y}$	$(X_1 - \bar{X}_1)^2$	$(X_2 - \bar{X}_2)^2$	$(Y - \bar{Y})^2$	$t_1 = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_1}$	$t_2 = \frac{X_2 - \bar{X}_2}{\sigma_2}$	$t_0 = \frac{Y - \bar{Y}}{\sigma_0}$	$t_1 \cdot t_0$	$t_2 \cdot t_0$	$t_1 \cdot t_2$
5	5	3,28	-3,75	3,35	0,028	14,06	11,23	0,0008	-1,356	1,874	0,091	-0,124	0,171	-2,542
5	0,833	3	-3,75	-0,81	-0,251	14,06	0,664	0,0631	-1,356	-0,455	-0,801	1,087	0,365	0,618
8	4,0	3,4	-0,75	2,35	0,148	0,562	5,529	0,0221	0,271	1,315	0,474	-0,128	0,623	-0,356
8	0,50	2,6	-0,75	-1,14	-0,651	0,562	1,319	0,4241	0,271	-0,642	-2,077	0,563	1,334	0,174
10	0,833	3,5	1,25	-0,81	0,248	1,562	0,664	0,0618	0,452	-0,455	0,799	0,358	-0,361	-0,206
10	0,666	3,3	1,25	-0,98	0,048	1,562	0,964	0,0023	0,452	-0,549	0,155	0,070	-0,085	-0,248
12	0,925	3,57	3,25	-0,72	0,318	10,562	0,522	0,1016	1,175	-0,404	1,016	1,195	-0,410	-0,475
12	0,429	3,36	3,25	-1,21	0,108	10,562	1,486	0,0118	1,175	-0,681	0,346	0,407	-0,236	-0,801
$\Sigma = 70$	13,18	26,01	-	-	-	$\Sigma = 53,5$	22,382	0,6878	-	-	-	$\Sigma = 3,429$	1,401	-3,837
$x = 8,75$	1,648	3,251	-	-	-	7,642	3,197	0,0982	-	-	-	0,428	0,175	-0,479
$\sigma = 2,76$	1,788	0,313	-	-	-	$\sigma = 2,764$	1,788	0,3134	-	-	-	-	-	-

Примечание. Σ – сумма значений; x – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение

Расчет уравнения η (β -распределения) эпюры распределения дождя для дождевальной насадки.

По данным, приведенным в таблице 2 приложения Е вычисляем коэффициенты регрессии:

$$r_{12} = 1/N \cdot \Sigma t_1 t_2 = 3,634652/8 = 0,454332$$

$$r_{01} = 1/N \cdot \Sigma t_0 t_1 = 5,912/8 = 0,739092$$

$$r_{02} = 1/N \cdot \Sigma t_0 t_2 = 5,8/8 = 0,678051$$

Составляем систему нормального уравнения:

$$\beta_1 + 0,4543 \cdot \beta_2 = 0,739092$$

$$0,4543 \cdot \beta_1 + \beta_2 = 0,678051$$

Вычисляем определители Δ , Δ_1 , Δ_2 :

$\Delta =$	1	0,4543	$= 1 - 0,19141 = 0,793583$
	0,4543	1	
$\Delta_1 =$	0,739092	0,4543	$= 0,790923 - 0,01818 = 0,431032$
	0,678051	1	
$\Delta_2 =$	1	0,703909	$= 0,342258$
	0,4543	0,67805	

Таким образом:

$$\beta_1 = \Delta_1/\Delta = 0,431032/0,793583 = 0,543147$$

$$\beta_2 = \Delta_2/\Delta = 0,342258/0,793583 = 0,431282$$

Переходя к натуральному масштабу, получим:

$$a_1 = \beta_1 \sigma / \sigma_1 = 0,543147 \cdot 0,402235 / 2,76457 = 0,079026;$$

$$a_2 = \beta_2 \sigma / \sigma_2 = 0,431282 \cdot 0,402235 / 0,748389 = 0,2318;$$

$$a_0 = Y - a_1 X_1 - a_2 X_2 = 2,1475 - 0,079026 \cdot 8,75 - 0,2318 \cdot 1,22 = 1,173227.$$

Уравнение регрессии в натуральном масштабе имеет вид:

$$\eta = 1,173227 + 0,079D + 0,2318(H/D);$$

Коэффициент множественной регрессии имеет значение:

$$R_{y,x,x} = \sqrt{(r_{01}^2 + r_{02}^2 - 2r_{01} \cdot r_{02} \cdot r_{12}) / (1 - r_{12}^2)} =$$

$$= \sqrt{(0,739^2 + 0,678^2 - 2(0,739) \cdot (0,678) \cdot 0,4543) / (1 - 0,4542^2)} = 0,8329.$$

Таблица 2 – Расчет параметра η (β -распределения) эпюры распределения дождя для дождевальной насадки

X_1 , (D, мм)	X_2 , (P/D)	Y , (η)	$X_1 - \bar{X}_1$	$X_2 - \bar{X}_2$	$Y - \bar{Y}$	$(X_1 - \bar{X}_1)^2$	$(X_2 - \bar{X}_2)^2$	$(Y - \bar{Y})^2$	$t_1 = \frac{X_1 - \bar{X}_1}{\sigma_1}$	$t_2 = \frac{X_2 - \bar{X}_2}{\sigma_2}$	$t_0 = \frac{Y - \bar{Y}}{\sigma_0}$	$t_1 \cdot t_0$	$t_2 \cdot t_0$	$t_1 \cdot t_2$
5	5	1,58	-3,75	-1,02	-0,567	14,06	1,040	0,322	-1,356	-1,362	0,091	1,913	1,922	1,848
5	0,833	2	-3,75	-0,02	-0,147	14,06	0,0004	0,021	-1,356	-0,026	-0,801	0,497	0,009	0,036
8	4,0	1,8	-0,75	-0,97	0,347	0,562	0,940	0,120	0,271	-1,296	0,474	0,234	1,119	0,351
8	0,50	2	-0,75	0,78	-0,147	0,562	0,608	0,0217	0,271	1,042	-2,077	0,099	-0,382	0,282
10	0,833	2,2	1,25	-0,02	-0,052	1,562	0,0004	0,002	0,452	-0,026	0,799	0,059	-0,003	-0,012
10	0,666	2,3	1,25	0,28	-0,152	1,562	0,078	0,0023	0,452	0,374	0,155	0,171	0,141	0,169
12	0,925	2,41	3,25	-0,14	-0,262	10,562	0,019	0,068	1,175	-0,187	1,016	0,767	-0,122	-0,219
12	0,429	2,89	3,25	1,11	-0,742	10,562	1,232	0,551	1,175	1,483	0,346	2,170	2,737	1,743
$\Sigma = 70$	13,18	17,18	–	–	–	$\Sigma = 53,5$	3,920	1,132	–	–	–	$\Sigma = 5,912$	5,424	3,634
$x = 8,75$	1,648	2,147	–	–	–	7,642	0,560	0,161	–	–	–	0,739	0,678	0,454
$\sigma = 2,764$	0,748	0,402	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–

Примечание. Σ – сумма значений; x – среднее значение; σ – среднеквадратичное отклонение.

Таблица 1 – Нормированное распределение слоя дождя вдоль радиуса захвата дождем дождевальной насадки и расчетные значения коэффициентов γ и η бета-распределения

X_i/R	h_i/h							
	$D = 6 \text{ мм}$			$D = 8 \text{ мм}$			$D = 10 \text{ мм}$	
	$P = 0,08 \text{ МПа}$	$P = 0,14 \text{ МПа}$	$P = 0,32 \text{ МПа}$	$P = 0,07 \text{ МПа}$	$P = 0,19 \text{ МПа}$	$P = 0,28 \text{ МПа}$	$P = 0,06 \text{ МПа}$	$P = 0,12 \text{ МПа}$
0,05	0,12	0,20	0,30	0,10	0,95	0,55	0,22	0,36
0,15	0,38	0,60	1,05	0,45	0,91	0,86	0,36	0,48
0,25	0,66	0,90	1,54	0,80	1,11	1,24	0,58	0,74
0,35	0,93	1,15	1,81	1,15	1,39	1,65	0,96	1,15
0,45	1,25	1,30	1,76	1,50	1,52	1,70	1,60	1,55
0,55	1,74	1,48	1,60	1,60	1,54	1,71	2,14	1,80
0,65	2,19	1,40	1,36	1,06	1,39	1,64	2,20	2,20
0,75	1,60	1,35	1,10	1,40	1,0	1,0	1,85	1,90
0,85	0,91	0,75	0,60	0,50	0,50	0,40	1,10	0,95
0,95	0,20	0,20	0,10	0,20	0,04	0,02	0,10	0,10
γ	2,817	2,190	2,020	2,970	1,635	1,640	3,0	1,870
η	2,040	2,0	2,370	2,710	2,050	1,950	2,220	1,569
X_{50}	0,636	0,544	0,428	0,535	0,377	0,403	0,606	0,605

X_i/R	h_i/h							
	$D=10$ мм	$D=12$ мм			$D=14$ мм		$D=16$ мм	
	$P=0,18$ МПа	$P=0,13$ МПа	$P=0,28$ МПа	$P=0,58$ МПа	$P=0,15$ МПа	$P=0,30$ МПа	$P=0,16$ МПа	$P=0,24$ МПа
0,05	0,52	0,28	0,38	0,07	0,30	0,20	0,10	0,18
0,15	0,80	0,30	0,45	0,15	0,32	0,38	0,25	0,28
0,25	1,10	0,68	0,75	0,20	0,64	0,50	0,58	0,60
0,35	1,55	1,10	1,24	0,40	1,29	0,84	0,88	1,30
0,45	1,90	1,60	1,48	1,0	1,65	1,40	1,16	1,59
0,55	2,14	1,94	1,78	1,60	1,90	1,75	1,44	1,82
0,65	2,20	2,33	1,85	1,79	1,84	1,90	1,60	1,90
0,75	1,85	1,90	1,42	1,60	1,29	1,68	1,30	1,20
0,85	0,80	1,20	0,50	1,0	0,60	0,82	0,40	0,25
0,95	0,10	0,20	0,02	0,20	0,10	0,20	0,02	0,05
γ	2,120	2,846	2,572	4,010	3,020	2,810	3,010	3,894
η	2,060	2,165	2,442	2,470	2,710	2,160	2,120	3,590
X_{50}	0,530	0,613	0,522	0,530	0,541	0,609	0,668	0,615

Примечание. Условные обозначения см. таблица 2.

Таблица 2 – Расчет уравнения медианного радиуса захвата дефлекторной насадки (X_{50}) в зависимости от диаметра сопла и давления

D , мм	P , МПа	P/D	X_{50}	$z = X_{50}-0,49$	$y = \lg 100z$	$x = 0,43H/D$	$x \cdot y$	x_2	X_{50pac}
6	0,080	1,330	0,605	0,115	1,060	0,5760	0,6120	0,3336	0,572
6	0,140	2,330	0,580	0,090	0,954	1,0131	0,9660	1,0263	0,549
6	0,326	5,430	0,510	0,020	0,301	2,3581	0,7090	5,5600	0,511
8	0,075	0,937	0,600	0,110	1,041	0,4069	0,4230	0,1655	0,584
8	0,195	2,430	0,500	0,010	0	1,0553	0	1,1137	0,547
8	0,285	3,560	0,520	0,030	0,477	1,5460	0,7370	2,3900	0,529
10	0,060	0,60	0,600	0,110	1,041	0,2606	0,2710	0,0690	0,595
10	0,120	1,20	0,600	0,110	1,041	0,5211	0,5420	0,2715	0,576
10	0,180	1,80	0,570	0,080	0,903	0,7817	0,7050	0,6110	0,560
12	0,130	1,083	0,600	0,110	1,041	0,4703	0,4895	0,2211	0,579
12	0,280	2,333	0,560	0,070	0,845	1,0131	0,8560	1,0263	0,549
12	0,580	4,833	0,540	0,050	0,699	2,0989	1,4670	4,4050	0,516
14	0,150	1,071	0,580	0,090	0,954	0,4651	0,4430	0,2160	0,580
14	0,300	2,140	0,560	0,070	0,845	0,9294	0,7850	0,8630	0,533
16	0,160	1,0	0,575	0,085	0,929	0,4343	0,4030	0,1886	0,582
16	0,245	1,531	0,550	0,060	0,778	0,6649	0,5170	0,4420	0,567
–	–	–	–	Сумма	12,909	14,5964	9,9250	18,905	–

Расчет параметров a и b в уравнения регрессии:

$$a = \frac{\sum Y \cdot \sum X^2 - \sum X \cdot \sum XY}{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{12,909 \cdot 18,905 - 14,596 \cdot 9,925}{16 \cdot 18,905 - 14,596^2} = \frac{99,184}{89,437} = 1,108,$$

$$b = \frac{n \cdot \sum XY - \sum X \cdot \sum Y}{n \cdot \sum X^2 - (\sum X)^2} = \frac{16 \cdot 9,925 - 14,596 \cdot 12,909}{16 \cdot 18,905 - 14,596^2} = \frac{-29,610}{89,437} = -0,331.$$

$$y = a + bx; \lg 100(X/R - 0,49) = 1,108 - 0,331(0,43P/D) = \\ = X/R - 0,49 = 0,1283e^{-0,33P/D} X/R = 0,49 + 0,1283e^{-0,33P/D}.$$

Коэффициент детерминации равен:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (X_{50_i} - X_{50_{расч}})^2}{\sum (X_{50_i} - X_{50_{ср}})^2} = 1 - \frac{0,00750}{0,01724} = 0,546 R = 0,751.$$

Таблица 1 – Карта настройки дождевальных насадок 13-опорной ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания (марка ДМ-365-68, $P_{вх} = 0,43$ МПа)

Порядковый номер насадки на пролете	Диаметр насадки, мм	Диаметр переходника, мм	Давление в трубопроводе, МПа	Давление перед насадкой, МПа	Расход воды насадкой на пролете, л/с
1	3,0	4,0	0,43	0,24	0,140
2, 3, 4, 5, 6	3,0	4,1	0,42	0,243	0,141
7, 8, 9, 10, 11	4,0	5,1	0,41	0,238	0,248
12, 13, 14, 15, 16	5,0	5,47	0,40	0,198	0,350
17, 18, 19, 20, 21	5,5	6,5	0,39	0,232	0,462
21, 22, 23, 24, 25	6,0	7,3	0,38	0,248	0,570
26, 27, 28, 29, 30	6,5	8,0	0,37	0,257	0,680
31, 32, 33, 34, 35	8,0	8,7	0,36	0,219	0,952
35, 36, 37, 38, 39	8,5	9,6	0,35	0,233	1,108
40, 41, 42, 43, 44	9,0	10,3	0,34	0,241	1,264
45, 46, 47, 48, 49	9,5	11,1	0,33	0,251	1,436
50, 51, 52, 53, 54	10,0	11,6	0,32	0,245	1,574
55, 56, 57, 58, 59	10,0	12,8	0,32	0,296	1,728
60, 61, 62, 63	11,0; 11,0; 11,0; 8,0	12,4; 12,4; 12,4; 9,0	0,32	0,24; 0,24; 0,24; 0,21	1,9; 1,9; 1,9; 0,94
Концевой дождевальный аппарат (КДА)	14,3–9,5— 6,3	–	0,32	0,32	6,6

Примечание. Общий расход воды ДМ «Фрегат» – 68 л/с.

Таблица 2 – Карта настройки дождевальных насадок 16-опорной ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания (ДМУ-Б-463-90, $P_{вх} = 0,5$ МПа)

Порядковый номер насадки на пролете	Диаметр насадки, мм	Диаметр переходника, мм	Давление в трубопроводе, МПа	Давление перед насадкой, МПа	Расход воды насадкой на пролете, л/с
1	3,0	3,7	0,494	0,236	0,139
2, 3, 4, 5, 6	3,5	3,2	0,482	0,140	0,146
7, 8, 9, 10, 11	4,0	5,3	0,465	0,286	0,272
12, 13, 14, 15, 16	5,0	5,9	0,450	0,250	0,3976
17, 18, 19, 20, 21	6,0	6,3	0,436	0,213	0,5232
21, 22, 23, 24, 25	6,5	7,2	0,422	0,233	0,6488
26, 27, 28, 29, 30	7,0	7,9	0,409	0,247	0,7744
31, 32, 33, 34, 35	8,0	7,8	0,397	0,196	0,90
35, 36, 37, 38, 39	8,5	8,4	0,386	0,199	1,025
40, 41, 42, 43, 44	9,0	8,9	0,377	0,200	1,151
45, 46, 47, 48, 49	9,0	10,0	0,369	0,246	1,276
50, 51, 52, 53, 54	9,5	10,5	0,353	0,239	1,402
55, 56, 57, 58, 59	9,5	11,8	0,340	0,284	1,528
60, 61, 62, 63, 64	10,0	12,0	0,331	0,271	1,653
65, 66, 67, 68, 69	10,0	13,1	0,325	0,314	1,779
70, 71, 72, 73, 74	11,0	12,5	0,321	0,245	1,904
75, 76, 77, 78	10; 10; 10; 8	12; 12; 12; 9	0,320	0,24; 0,24; 0,24; 0,21	1,68; 1,68; 1,68; 0,94
КДА	15,9–9,5— 7,9	–	0,320	0,42	8,74

Примечание. Общий расход воды ДМ «Фрегат» – 90 л/с.

Таблица 1 – Дисперсионный анализ урожайности сои при поливе серийными дождевальными насадками ДН и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками УПД-ДН за 2014 г.

Тип дождевателя	Урожайность по повторениям, ц/га								Сумма по наблюдениям	Средняя урожайность, ц/га
	1	2	3	4	5	6	7	8		
ДН	19,6	19,9	19,8	19,7	20,0	19,9	20,2	20,1	159,2	19,9
УПД-ДН	23,2	22,9	23,7	23,1	23,5	23,0	23,4	23,6	186,4	23,3

1. Определяем среднюю урожайность по типам дождевателей: $X_{ДН}=19,9$ ц/га; $X_{УПД-ДН}=23,3$ ц/га; средняя урожайность по опыту: $X_0 = 21,6$ ц/га.

2. Определяем общую сумму квадратов отклонений:

$$C_y = \sum (X_i - X_0)^2 = (19,6 - 21,6)^2 + \dots + (23,6 - 21,6)^2 = 47,12.$$

3. Определяем сумму квадратов отклонений для вариантов:

$$C_v = \sum (X_1 - X_i)^2 + \dots + (X_2 - X_i)^2 = (19,9 - 21,6)^2 + \dots + (23,3 - 21,6)^2 = 46,24.$$

4. Определяем сумму квадратов ошибки:

$$C_z = C_y - C_v = 47,12 - 46,24 = 0,88.$$

5. Общее число степеней свободы: $N-1=8-1=7$, также разбиваем на две части – степень свободы для вариантов: $\ell-1=2-1=1$ и ошибок: $N-\ell=8-2=6$.

6. Для определения фактического критерия существенности находим два средних квадрата (дисперсии):

$$\text{для вариантов: } S_v^2 = \frac{C_v}{N-l} = \frac{46,24}{2-1} = 46,24; \text{ ошибки: } S^2 = \frac{C_z}{N-l} = \frac{0,88}{8-2} = 0,1466.$$

7. Определяем критерий существенности:

$$F_\phi = S_v^2 / S^2 = 46,24 / 0,1466 = 315,41.$$

Так как $F_\phi > F_{05} = 315,4 > 4,08$. Следовательно, выборочные средние X_1 и X_2 существенно различаются по урожайности на 5 %-ом уровне значимости.

8. Определяем наименьшую существующую разность:

$$HCP_{05} = t_{05} S_d = t_{05} (\sqrt{2S^2 / n}) = 2,36(2 \cdot 0,1466 / 8)^{0,5} = 0,442$$

$$9. \text{ Ошибка опыта: } O = \frac{t_{05} S_d}{X} 100 = \frac{0,442}{21,6} 100 = 2,04\%.$$

Таблица 1 – Дисперсионный анализ урожайности сои при поливе серийными дождевальными насадками ДН и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками УПД-ДН за 2015 г.

Тип дождевателя	Урожайность по повторениям, ц/га								Сумма по наблюдениям	Средняя урожайность, ц/га
	1	2	3	4	5	6	7	8		
ДН	20,5	20,8	21,0	21,1	21,3	20,9	20,7	20,9	167,2	20,9
УПД-ДН	24,3	24,2	24,1	24,4	24,6	24,5	24,0	24,3	194,4	24,3

1. Определяем среднюю урожайность по типам дождевателей: $X_{ДН}=20,9$ ц/га; $X_{УПД-ДН}=24,3$ ц/га; средняя урожайность по опыту: $X_o = 22,6$ ц/га.

2. Определяем общую сумму квадратов отклонений:

$$C_y = \sum (X_i - X_o)^2 = (20,5 - 22,6)^2 + \dots + (24,3 - 22,6)^2 = 46,94.$$

3. Определяем сумму квадратов отклонений для вариантов:

$$C_v = \sum (X_1 - X_i)^2 + \dots + (X_2 - X_i)^2 = (20,9 - 22,6)^2 + \dots + (24,3 - 22,6)^2 = 46,24.$$

4. Определяем сумму квадратов ошибки:

$$C_z = C_y - C_v = 46,94 - 46,24 = 0,7.$$

5. Общее число степеней свободы: $N-1=8-1=7$, также разбиваем на две части – степень свободы для вариантов: $\ell-1=2-1=1$ и ошибок: $N-\ell=8-2=6$.

6. Для определения фактического критерия существенности находим два средних квадрата (дисперсии):

$$\text{для вариантов: } S_v^2 = \frac{C_v}{N-l} = \frac{46,24}{2-1} = 46,24; \text{ ошибки: } S^2 = \frac{C_z}{N-l} = \frac{0,7}{8-2} = 0,1166.$$

7. Определяем критерий существенности:

$$F_\phi = S_v^2 / S^2 = 46,24 / 0,1166 = 396,36.$$

Так как $F_\phi > F_{05} = 396,3 > 4,08$. Следовательно, выборочные средние X_1 и X_2 существенно различаются по урожайности на 5 %-ом уровне значимости.

8. Определяем наименьшую существующую разность:

$$HCP_{05} = t_{05} S_d = t_{05} (\sqrt{2S^2 / n}) = 2,36(2 \cdot 0,1166 / 8)^{0,5} = 0,402$$

$$9. \text{ Ошибка опыта: } O = \frac{t_{05} S_d}{X} 100 = \frac{0,402}{22,6} 100 = 1,78\% .$$

Таблица 1 – Дисперсионный анализ урожайности сои при поливе серийными дождевальными насадками ДН и устройствами приповерхностного дождевания с дождевальными насадками УПД-ДН за 2016 г.

Тип дождевателя	Урожайность по повторениям, ц/га								Сумма по наблюдениям	Средняя урожайность, ц/га
	1	2	3	4	5	6	7	8		
ДН	21,7	20,9	20,8	21,0	21,3	21,8	21,6	21,3	170,4	21,3
УПД-ДН	24,6	24,9	25,1	25,4	25,0	24,8	25,6	25,3	200,8	25,1

1. Определяем среднюю урожайность по типам дождевателей: $X_{ДН}=21,3$ ц/га; $X_{УПД-ДН}=25,1$ ц/га; средняя урожайность по опыту: $X_o = 23,2$ ц/га.

2. Определяем общую сумму квадратов отклонений:

$$C_y = \sum (X_i - X_o)^2 = (21,7 - 23,2)^2 + \dots + (25,3 - 23,2)^2 = 59,54.$$

3. Определяем сумму квадратов отклонений для вариантов:

$$C_v = \sum (X_1 - X_i)^2 + \dots + (X_2 - X_i)^2 = (21,3 - 23,2)^2 + \dots + (25,1 - 23,2)^2 = 57,76.$$

4. Определяем сумму квадратов ошибки:

$$C_z = C_y - C_v = 59,54 - 57,76 = 1,78.$$

5. Общее число степеней свободы: $N-1=8-1=7$, также разбиваем на две части – степень свободы для вариантов: $\ell-1=2-1=1$ и ошибок: $N-\ell=8-2=6$.

6. Для определения фактического критерия существенности находим два средних квадрата (дисперсии):

$$\text{для вариантов: } S_v^2 = \frac{C_v}{N-l} = \frac{57,76}{2-1} = 57,76; \text{ ошибки: } S^2 = \frac{C_2}{N-l} = \frac{1,78}{8-2} = 0,2966$$

7. Определяем критерий существенности:

$$F_\phi = S_v^2 / S^2 = 57,76 / 0,2966 = 194,74.$$

Так как $F_\phi > F_{05} = 194,7 > 4,08$. Следовательно, выборочные средние X_1 и X_2 существенно различаются по урожайности на 5 %-ом уровне значимости.

8. Определяем наименьшую существующую разность:

$$HCP_{05} = t_{05} S_d = t_{05} (\sqrt{2S^2 / n}) = 2,36(2 \cdot 0,2966 / 8)^{0,5} = 0,642$$

$$9. \text{ Ошибка опыта: } O = \frac{t_{05} S_d}{X} 100 = \frac{0,642}{23,2} 100 = 2,76\% .$$

Таблица 1 – Динамика влажности почвы на посевах сои под ДМ «Фрегат» № 4 в ООО «Березовское»

Глубина, см	Исходная влажность почвы до полива 6.05.2016 г.		Площадка 1		Площадка 2		Площадка 5		Площадка 6	
	W, %	Z _в , мм	W, %	Z _в , мм	W, %		W, %		W, %	
Влажность почвы до полива 05. 07.2016 г.										
0–5	6,53	36,0	–	–	–	–	–	–	–	–
5–10	11,7	65,0	14,0	157	11,9	130	14,4	161	7,5	84
10–20	17,8	224,0	13,8	174	12,4	156	14,5	183	8,9	112
20–30	18,5	234,0	14,3	182	13,7	174	14,4	180	12,9	164
30–40	18,1	241,0	14,9	198	14,8	187	15,3	203	15,3	203
40–50	17,4	235,0	15,2	205	15,1	204	16,9	228	15,9	215
50–60	16,8	227,0	16,8	227	14,7	198	16,2	219	15,3	206
60–70	16,4	219,0	16,5	221	16,8	185	13,5	181	13,3	178
70–80	15,7	210,0	15,2	204	12,6	169	11,1	149	14,1	189
80–90	15,4	217,0	14,8	209	11,3	159	10,6	149	15,1	213
90–100	15,1	219,0	14,1	204	9,6	139	11,3	164	12,2	177
средняя в слое 0–50 см		103,5		73,4				95,8		77,8

Глубина, см	Исходная влажность почвы до полива 6.05.2016 г.		Площадка 1		Площадка 2		Площадка 5		Площадка 6	
	W, %	Z _в , мм	W, %	Z _в , мм	W, %	Z _в , мм	W, %	Z _в , мм	W, %	Z _в , мм
Влажность почвы после первого полива 08. 07.2016 г.										
0–10			15,0	168	17,3	194	16,9	190	15,3	172
10–20			15,9	200	18,0	227	17,1	215	15,8	199
20–30			16,5	209	17,9	227	16,3	207	16,5	209
30–40			15,4	205	16,2	215	15,2	202	16,9	225
40–50			13,9	88	15,0	202	15,3	207	17,3	234
50–60			14,4	194	14,7	198	15,3	207	17,6	237
60–70			14,9	200	14,4	193	14,8	198	17,5	235
70–80			14,0	188	13,2	197	14,2	190	16,9	226
80–90			13,5	180	11,9	168	13,4	189	16,2	228
90–100			12,8	185	9,7	141	13,6	197	15,7	228
средняя в слое 0–50 см				96,9		106,6		102,1		103,9
Прирост влаги				23,5		20,3		6,3		26,1

Глубина, см	Площадка 1		Площадка 2		Площадка 5		Площадка 6	
	W, %	Z _в , мм						
Влажность почвы перед 2-м поливом 23.07.2016 г.								
0–10	7,8	87	6,4	72	8,8	99	8,3	9,3
10–20	8,2	103	6,9	87	8,8	110	8,9	112
20–30	8,9	113	7,7	98	8,5	107	9,7	123
30–40	9,2	122	8,4	108	8,4	111	10,2	135
40–50	9,5	128	8,6	116	8,4	113	10,9	145
50–60								
60–70								
средняя 0–50		55,3		48,7		54,0		61,0
Влажность почвы после 2-го полива 25.07.2016 г.								
0–10	8,4	94	10,4	115	10,8	121	8,9	100
10–20	8,0	101	9,8	123	10,8	136	10,0	126
20–30	8,2	104	9,1	115	10,4	132	11,0	140
30–40	8,4	112	8,6	114	9,8	130	10,3	137
40–50	8,5	115	8,5	115	9,9	134	9,0	121
50–60	9,4	127	8,7	117	9,6	130	9,0	121
60–70	5,6	129	9,0	121	8,8	118	10,0	134
средняя 0–50		52,5		58,3		65,3		62,4

Примечание: W – влажность почвы; Z_в – запас влаги в 50 см слое почвы.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

1. Наименование организации и объекта, где внедрено мероприятие

ООО «Берёзовское» Энгельсского района Саратовской области

2. Шифр работы, наименование мероприятия, по какому плану внедрялось

«Провести технологические работы по внедрению и оценке эффективности приповерхностного дождевания на ДМ «Фрегат»

3. Наименование научной организации, проводящей научную разработку и опытное освоение внедряемого мероприятия

ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»

4. Срок внедрения мероприятия 2013-2016 г.

5. Краткая характеристика и новизна внедряемого мероприятия, взамен чего внедряется

Внедрение на ДМ «Фрегат» хоз. №4 новых устройств приповерхностного полива с дождевальными насадками с дефлектором «обратный конус», устанавливаемых на трубопроводе машины по учащенной схеме и секторного полива в районе тележек обеспечивает:

-повышение равномерности полива до 0,72...0,74 за счет увеличения радиуса захвата дождем при ветре и степени перекрытия струй, а также за счет увеличения устойчивости дождевого облака к ветру. Потери воды на испарение и снос дождя уменьшаются с 15...20% до 4...10%. К преимуществам насадок относятся: высокая надежность работы в результате отсутствия вращающихся деталей; низкая вероятность засорения мусором; создание мелкокапельного дождя (диаметр капель 0,6...1,0 мм); снижение дождевого облака с 5...8 до 1,5...2,5 м;

Улучшение качественных показателей полива от применения устройств приповерхностного полива обеспечил прибавку урожая на посевах сои – 3,5 ц/га.

6. Основные показатели внедренного мероприятия:

а) фактический объем внедрения в натуральных показателях

Одна ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания, площадь орошения 66 га.

б) эффективность внедрения

Расчетный годовой экономический эффект составляет 508,2 тыс. руб./маш.

Врио директора
ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»

Ю.А. Гопкалов



В.В. Гришанов

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

**ПАТЕНТ**

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 170892

Дождевальная машина

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации" (ФГБНУ "ВолжНИИГиМ") (RU)*

Авторы: *Рыжко Николай Федорович (RU), Гопкалов Юрий Антонович (RU), Рыжко Сергей Николаевич (RU), Рыжко Наталья Васильевна (RU), Карнова Ольга Валериевна (RU), Ботов Сергей Васильевич (RU)*

Заявка № 2016131741

Приоритет полезной модели 01 августа 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 12 мая 2017 г.

Срок действия исключительного права на полезную модель истекает 01 августа 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ

№ 169912

Дождевальная машина

Патентообладатель: *Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Волжский научно-исследовательский институт гидротехники и мелиорации" (ФГБНУ "ВолжНИИГиМ") (RU)*

Авторы: *Рыжко Николай Федорович (RU), Гопкалов Юрий Антонович (RU), Рыжко Сергей Николаевич (RU), Рыжко Наталья Васильевна (RU), Карнова Ольга Валериевна (RU), Ботов Сергей Васильевич (RU), Органов Михаил Сергеевич (RU)*

Заявка № 2016136589

Приоритет полезной модели 12 сентября 2016 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 06 апреля 2017 г.

Срок действия исключительного права

на полезную модель истекает 12 сентября 2026 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ившин



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2539513

ДОЖДЕВАЛЬНАЯ НАСАДКА

Патентообладатель(ли): *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова" (RU)*

Автор(ы): *см. на обороте*

Заявка № 2013133345

Приоритет изобретения 17 июля 2013 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 04 декабря 2014 г.

Срок действия патента истекает 17 июля 2033 г.

Врио руководителя Федеральной службы по интеллектуальной собственности

Л.Л. Кирий



Расчет экономической эффективности внедрения на ДМ «Фрегат» устройств приповерхностного дождевания в ООО «Берёзовское»

Внедрение на ДМ «Фрегат» хозяйство № 4 новых устройств приповерхностного дождевания, устанавливаемых на трубопроводе машины через 5–6 метров с дождевальными насадками с дефлектором «обратный конус», в районе тележек обеспечивает:

– повышение равномерности полива от 0,72 до 0,74 за счет увеличения радиуса захвата дождем и степени перекрытия струй, а также за счет увеличения устойчивости дождевого облака к ветру. Потери воды на испарение и унос дождя уменьшаются с 15–20 % до 4–10 %. К преимуществам насадок относится: высокая надежность работы в результате отсутствия вращающихся деталей; низкая вероятность засорения мусором; создание мелкокапельного дождя (диаметр капель 0,6...1,0 мм); снижение дождевого облака с 5...8 до 1,0...2,5 м.

Улучшение показателей качества полива от применения на ДМ «Фрегат» устройств приповерхностного дождевания обеспечил среднюю прибавку урожая на посевах сои за 2014–2016 г. – 3,5 ц/га. Дополнительный валовой сбор сои на площади полива 66 га ДМ «Фрегат» хозяйство № 4 составил 3,5 ц/га × × 66 га = 231 ц. или 23,1 т. При стоимости за 1 тонны зерна сои – 22 000 рублей расчетный экономический эффект (\mathcal{E}_p) составил:

$$\mathcal{E}_p = 23,1 \text{ т} \times 22000 \text{ руб./т} = 508200 \text{ руб.} = 508,2 \text{ тыс. руб. на машину.}$$