

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

Л.А. Журавлева, А.С. Апатенко, Н.С. Севрюгина, О.М. Кузина



**РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И
ЭКСПЛУАТАЦИИ ШИРОКОХВАТНЫХ
ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН**

Монография

Москва - 2023

УДК 631

Ж 91

Рецензенты

Д.т.н., зав. отделом модернизации технических средств и технологий полива ФГБНУ «ВолжНИИГиМ»

Н.Ф. Рыжко

К.т.н., доцент кафедры «Техносферной безопасности и транспортно-технологических машин» ФГБОУ ВО СГУГБИ имени Н.И. Вавилова

О.В. Кабанов

Журавлева Л.А.

Ж 91

Ресурсосбережение при проектировании и эксплуатации широкозахватных дождевальных машин: монография / Л.А. Журавлева, А.С. Апатенко, Н.С. Севрюгина, О.М. Кузина. – Москва: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023. – с 237.

ISBN 978-5-00207-317-7

В монографии рассмотрены существующие дождевальные машины, их конструктивные особенности, направления развития. Приведены технические решения широкозахватных дождевальных машин кругового действия, повышающие их технологические и эксплуатационные показатели за счет оптимизации водопроводящего пояса, фермы, рационального выбора ходового оборудования, новых низконапорных дождевателей, системы автоматизации и управления. Проанализированы технологические процессы полива, обеспечивающие снижение непроизводительных потерь воды, изменения поливной нормы в соответствии с уровнем влагозапасов участков поля на момент их полива, адаптации режима полива к изменяющимся в течение поливного периода условиям.

Монография представляет интерес для научных работников, конструкторов, студентов, магистров и аспирантов, занятых проектированием и оптимизацией параметров машин для дождевания сельскохозяйственных культур, инженерно-технических работников, занятых в сфере сельского хозяйства, эксплуатирующих дождевальную технику.

ISBN 978-5-00207-317-7

УДК 631

© Журавлева Л.А., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С., Кузина О.М., 2023

© ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1 МАШИНЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР.....	8
1.1. Общая классификация дождевальных машин, «советская» дождевальная техника.....	8
1.2. Обзор конструкций дождевальных машин кругового действия, конструктивные особенности.....	22
1.3. Основные направления ресурсосбережения для дождевальных машин кругового действия.....	26
1.4. Особенности проектирования элементов дождевальных машин кругового действия.....	37
1.5. Качество полива. Дождеобразующие устройства.....	50
1.6. Критерии оценки дождевальных машин кругового действия.....	65
2 ПОЛИВ ДОЖДЕВАНИЕМ.....	74
2.1 Допустимая интенсивность при дождевании. Впитывание воды в почву. Ирригационная эрозия почвы.....	74
2.2 Схемы движения. Технологические приемы. Режим полива.....	79
2.3 Схемы расстановки дождевателей.....	81
2.4 Влияние уклона на качество полива.....	84
3 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ.....	87
3.1. Этапы создания дождевальных машин.....	87
3.2. Разработка новых образцов дождевальной техники.....	89
3.3. Разработка низконапорных дождеобразующих устройств	98

	стр
3.4. Теоретические основы проектирования водопроводящего трубопровода дождевальных машин кругового действия	125
3.5. Снижение материальных ресурсов при проектировании широкозахватных дождевальных машин кругового действия.....	132
3.6. Повышение эффективности использования земельных ресурсов.....	140
3.7. Влияние нагрузки, приходящейся на ходовые системы на сопротивление передвижению машины.....	147
4 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИВА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫМИ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ.....	152
4.1 Оптимизация режима работы и основных параметров электрифицированных дождевальных машин кругового действия....	152
4.2 Планирование поливов при орошении на основе информационно-советующих систем.....	163
5 КРАТКАЯ МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	166
6 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	191
6.1 Результаты исследований разработанных низконапорных дождевателей.....	191
6.2 Лабораторные исследования влияния давления воздуха в шине и нагрузки, приходящейся на ось колеса на глубину колеи и сопротивление передвижению колес.....	205
6.3 Оценка энергетических показателей при поливе ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и ДМ «КАСКАД» с низконапорными дождевателями.....	206

	стр
6.4 Норма полива до стока при поливе дождевальными машинами с низконапорными дождевателями.....	189
6.5 Результаты исследования колееобразования для различных почвощадящих схем расстановки дождевателей, длин пролетов и ходовых систем.....	209
6.6 Результаты сравнения стандартной и оптимизированной технологий полива электрифицированными дождевальными машинами кругового действия.....	214
6.7 Результаты исследований влияния рельефа местности на характеристики машины и качественные показатели полива.....	215
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	230
ЛИТЕРАТУРА.....	231

ВВЕДЕНИЕ

Основным способом механизации орошения является дождевание. В настоящее время в России 4,5 млн. га земель поливаются этим способом. Полив 70% площади обеспечивается широкозахватными дождевальными машинами (ДМ).

В настоящее время вопрос, связанный с мелиорацией, является актуальным за счет ежегодного ввода в действие новых орошаемых площадей. Однако большинство оросительной техники было создано в советский период и не обеспечивает современные требования технологии полива.

Выпускаемые массово дождевальные машины «Фрегат», «Днепр», «Кубань» уже материально и морально устарели. Поэтому необходимы шаги не столько по совершенствованию дождевальной техники «советских» времен, сколько по конструированию и созданию новых, современных, недорогих и эффективных машин.

Необходимо параллельно модернизировать дождевальную технику старого образца и конструировать, и создать технику нового поколения, модификации, расширяющие эксплуатационные возможности и повышающие эффективность работы.

Важнейшими факторами конкурентоспособности современной широкозахватной дождевальной техники являются такие показатели как производительность и надежность работы, энергоемкость и экологическая безопасность процесса полива.

Для улучшения показателей работы широкозахватной дождевальной техники необходимо всестороннее изучение условий эксплуатации и выявление влияния на них конструкционных особенностей машин.

За период времени с начала 90-х годов предприятия-производители оросительной техники, как правило, переориентировались на выпуск другой продукции, однако в последние годы начали активно развиваться такие предприятия как: «Волгоградский завод оросительной техники»; «ПО Кропоткинский машиностроительный завод «Радуга», г. Кропоткин; ООО «БСГ», г. Тольятти; ООО «Агрополив СПб», г. Санкт-Петербург; ООО «САБОНагро», г. Гулькевичи; «Казанский завод оросительной техники», г. Казань; ООО «АгисИнжиниринг», г. Москва; «Мелиотехмаш», г. Котельников; «Волгоградский тракторный завод»; ООО «Мелиоративные машины», г. Саратов [28, 29, 38].

По данным Министерства сельского хозяйства РФ, при сохранении существующих площадей орошения (4,28 млн. га) стране требуется только широкозахватных ДМ кругового действия – 29 тыс. шт. [17, 29, 42, 43].

В настоящее время в мелиоративном комплексе РФ многоопорные дождевальные машины являются основными, и разработка конкурентоспособных, современных отечественных дождевальных машин на основе ресурсосберегающих технологий, т. е рациональное использование водных, земельных, материальных, энергетических, трудовых и финансовых ресурсов при производстве и эксплуатации является актуальной задачей.

Ресурсосбережение при конструировании и эксплуатации широкозахватных дождевальных машин, обеспечение эффективной и производительной работы в

различных условиях эксплуатации, требованиях к режимам работы на полях, имеющих значительную изменчивость физико-механических свойств почвы, представляет собой сложную техническую задачу оптимизации всех параметров ДМ и требует решения комплекса научных и практических задач.

Все технические и технологические разработки, рекомендации для современных дождевальных машин должны обеспечивать экономию материальных ресурсов, уменьшение эксплуатационных расходов, снижение энергопотребления и затрат труда на обслуживание.

В монографии рассмотрены существующие дождевальные машины, их конструктивные особенности, направления совершенствования. Приведены технические решения широкозахватных дождевальных машин кругового действия, повышающие их технологические и эксплуатационные показатели за счет оптимизации водопроводящего пояса, фермы, рационального выбора ходового оборудования, новых низконапорных дождевателей, системы автоматизации и управления.

Изложены теоретические основы математического моделирования водопроводящего пояса широкозахватных дождевальных машин с оптимизацией схем расстановки дождеобразующих устройств, математические зависимости для расчета показателей распыла дождевальных струй в зависимости от конструктивно-технологических параметров дождеобразующих устройств и скорости ветра.

Проанализированы технологические процессы полива, обеспечивающие снижение непроизводительных потерь воды, изменения поливной нормы в соответствии с уровнем влагозапасов участков поля на момент их полива, адаптации режима полива к изменяющимся в течение поливного периода условиям.

Представленные в монографии данные могут служить методической основой к решению проблемы создания ресурсосберегающих широкозахватных дождевальных машин кругового действия за счет рациональных конструктивно-технологических решений и конструкций, обеспечивающих энергоэффективный, качественный полив в низконапорных режимах.

1 МАШИНЫ И УСТАНОВКИ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР

1.1 Общая классификация дождевалых машин, «советская» дождевальная техника

По способу орошения различают дождевальные, поливные (для поверхностного полива) машины и установки и машины для подпочвенного орошения. Машины и установки бывают стационарные, позиционного действия (машина периодически перемещается и орошает с каждой позиции определенную площадь) и работающие в движении.

Наибольшее распространение получили дождевальные машины, укомплектованные дождевальными насадками или аппаратами.

Самоходные многоопорные машины фронтального действия бывают с двигателем внутреннего сгорания и электроприводом. Первые имеют трубопровод (рис. 1.1), собранный из отдельных секций, который является осью жестко закрепленных на нем опорных колес. Примером является широко известная дождевальная машина ДКШ-64 «Волжанка».

На каждой секции трубопровода установлен дождевальный аппарат (рис.1.2) с механизмом самоустановки, который при вращении трубопровода обеспечивает постоянное вертикальное положение дождевального аппарата [16].



Рисунок 1.1 – Дождевальная машина ДКШ-64 «Волжанка»



Рисунок 1.2 – Дождевальный аппарат ДКШ-64 «Волжанка»

В средней части трубопровода расположена приводная тележка (рис. 1.3), на раме которой установлен двигатель с реверс-редуктором. Через цепной привод приводятся во вращение ведущие колеса и вал-труба, с которой фланцами соединен трубопровод [16, 63].



Рисунок 1.3 – Тележка ДКШ-64 «Волжанка»

Краткие технические характеристики ДКШ-64 «Волжанка» представлены в таблице 1.1 [63].

Таблица 1.1 – Техническая характеристика дождевальной машины ДКШ-64 "Волжанка"

Марка машины	ДКШ-64 дождеватель колёсный широкозахватный с расходом воды 64 л/с	
Тип установки	самоходный дождевальный трубопровод позиционного действия	
Источник воды	от гидрантов закрытой стационарной или разборной оросительной сети с водоподачей стационарными или передвижными насосными станциями	
Ширина захвата (двух крыльев), м	800	
Расход воды, л/с	64	
Напор на гидранте, МПа	0,4	
Интенсивность дождя, мм/мин	0,25...0,3	
Расстояние между гидрантами, м	18	
Площадь обслуживания за сезон, га	70	
Площадь, поливаемая с одной позиции, га	1,45	
Привод - двигатель внутреннего сгорания "Дружба-4"	3 кВт	
Допустимый уклон	0,02	
Обслуживаемый персонал	1 человек на 2-3 установки	

Дождевальная машина фронтального перемещения ДФ-120 «Днепр» с электроприводом предназначена для полива всех сельскохозяйственных культур включая и высокостебельные (рис. 1.4). Полив осуществляется позиционно от гидрантов закрытой оросительной сети. Перемещение между рабочими позициями машины выполняется при помощи электропривода.

Техническая характеристика базовой модели ДФ-120 «Днепр» приведена в табл. 1.2 [63].

Таблица 1.2 – Техническая характеристика дождевателя ДФ-120 «Днепр»

Расстояние гидрантов оросительной сети друг от друга, м	54
1	2
Расход воды, л/с	120

1	2
Рабочее давление, МПа	0,46
Средняя интенсивность дождя, мм/мин	до 0,3
Скорость передвижения с позиции на позицию, м/мин	8,16
Ширина захвата,	460
Расстояние между позициями, м	54
Производительность за 1 час чистой работы (при норме полива 600 м ³ /га), га	0,72
Высота расположения водопроводящего пояса по оси, мм	2100
Число самоходных тележек	17
Привод самоходных тележек	электрический
Источник электроэнергии	Передвижная электрическая станция-трактор ЮМЗ-6Л
Напряжения цепи электропривода, В	220
Напряжение цепи управления, В	127
Мощность электродвигателя самоходной тележки, кВт	1,1
Управление электроприводом дождевателя	Дистанционное из кабины трактора

Высокопроизводительной, автоматизированной машиной, получившей наибольшее распространение стала электрическая дождевальная машина ЭДМФ "Кубань" ЭДМФ. Осуществляющая забор воды из открытого облицованного канала, предназначена для полива различных сельскохозяйственных культур, включая высокостебельные, имеющая возможность использоваться практически на любых почвах со спокойным рельефом (рис. 1.5).

Одна машина может полить площадь от 120 до 200 га в зависимости от зоны применения. Полив осуществляется в режиме прерывистого движения вдоль открытого оросительного канала. Поливная норма регулируется за счет изменения средней скорости перемещения машины. Максимальная норма полива за один проход 600 м³/га .

Дождевальная машина "Кубань" представляет собой движущийся фронтально водопроводящий трубопровод, состоящий из двух дождевальных крыльев, которые опираются на 16 опорных тележек.

Подача воды в трубопровод осуществляется дизель-насосной или электродвигатель - насосной установкой из открытого облицованного канала.

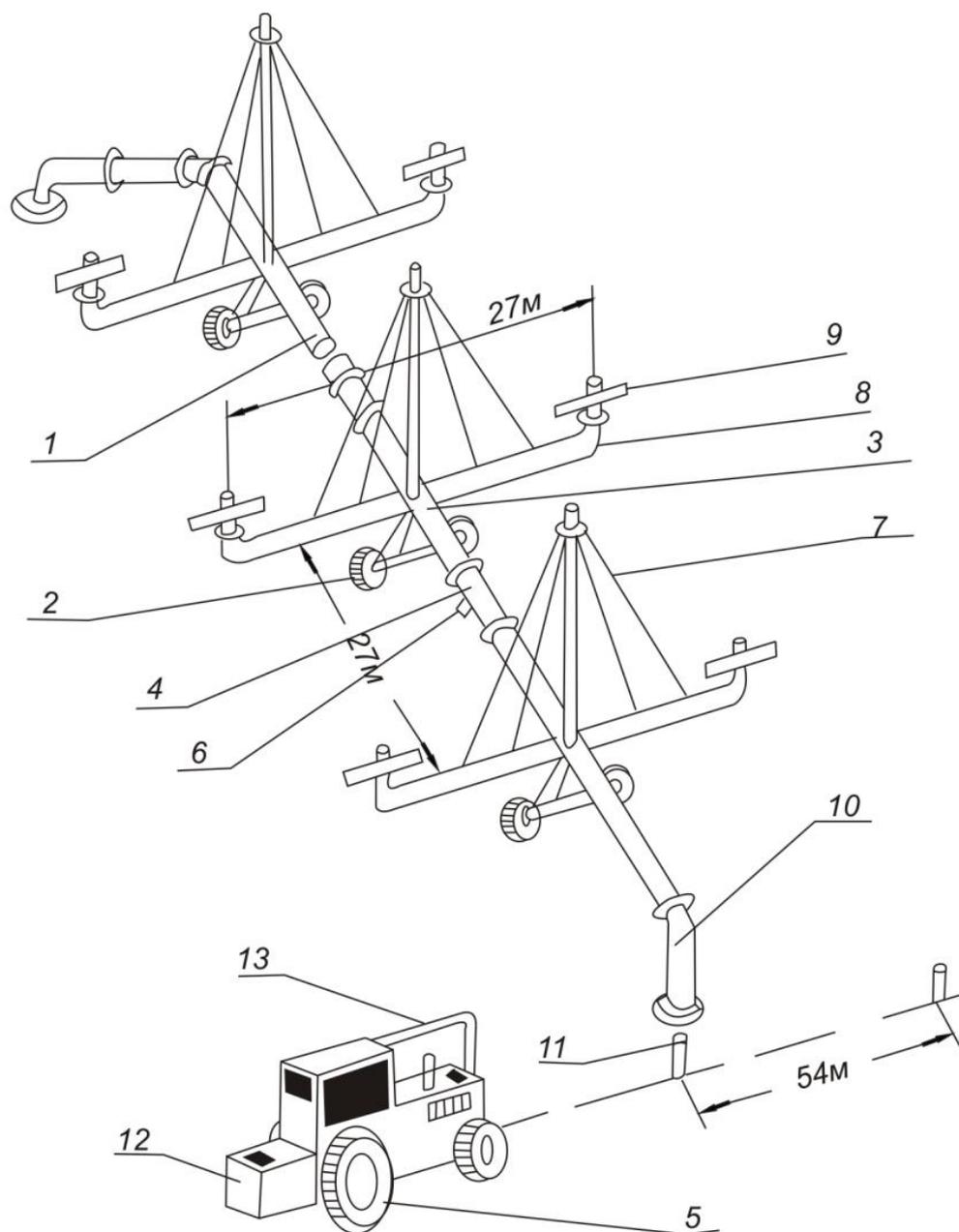


Рисунок 1.4 – Конструктивная схема дождевальной машины ДФ-120 «Днепр»: 1–водопроводящий пояс (алюминиевые трубы диаметром 180 мм), 2–самоходные тележки, 3–опорные трубы, 4– соединительные трубы, 5–трактор, 6–сливной клапан, 7–система тросов, 8–ферма-открылка, 9–дождевальные аппараты; 10–подсоединительный трубопровод, 11–гидрант

Поливная норма регулируется за счет изменения средней скорости движения опорных тележек при постоянной производительности водяного насоса.

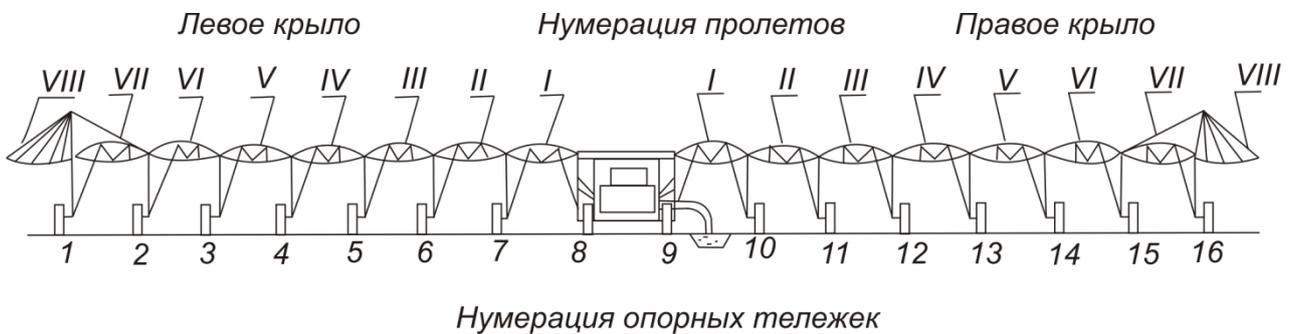


Рисунок 1.5 – ЭДМФ «Кубань»

Полив выполняется дождеванием с помощью короткоструйных, низконапорных насадок секторного действия. Машина оборудована электрической системой автоматического управления и защиты.

Дождевальную машину "Кубань" рекомендуется использовать при следующих условиях: глубина залегания пресных грунтовых вод не менее 1,5 м; наличие твердых частиц в оросительной воде размером более 0,5 мм (при обнаружении взвешенных частиц более 0,5 воду необходимо очищать); скорость ветра не должна превышать 7 м/с, а потери воды на испарение - не более 15%. Технические характеристики представлены в таблице 1.3 [63].

Таблица 1.3 – Техническая характеристика ДМ "КУБАНЬ"

Марка	ЭДМФ "Кубань"
Тип машины	электрическая, колесная, много-опорная, фронтального перемещения.
Водозабор	из открытого облицованного канала
Тип дождевальных насадок	короткоструйные, низконапорные, секторного действия
Число насадок	294
Число опорных тележек	16
Расход воды, л/с	165...170
Номинальный напор на входе в машину, МПа	0,34...0,31
Длина машины, м	790
Скорость перемещений машины, м/мин	0,19...2,0
Расстояние между опорами, м	52,5
Средняя интенсивность дождя, мм/мин	до 1,2
Напряжение в силовой сети, В	380
Напряжение на управление, В	220
Тип электродвигателя	Асинхронный, 3-х фазный, переменного тока
Потребляемая мощность электродвигателя, кВт	2,2

Центральный пролет состоит из силового агрегата, в который входят дизель-насосная станция и генератор, топливных баков, всасывающего и нагнетательного трубопровода, прибора стабилизации курса (ПСК), центральной опорной тележки, водопроводящего трубопровода.

Силовой агрегат расположен сбоку от канала. Генератор предназначен для подачи электроэнергии на двигатели мотор-ретукторов опорных тележек и приборы системы управления машины.

Широко применяют дождевальные машины навесные на трактор. На гусеничном или колесном тракторе смонтирован центробежный насос с редуктором и приводом от вала отбора мощности трактора через карданный вал. Примером является ДДН-70 (рис.1.6).

Насос имеет трубопровод со всасывающим клапаном и подает воду под давлением в ствол аппарата, который вращается по кругу или сектору от механического привода. Машина оборудована баком, который служит для заполнения всасывающей линии перед пуском и подкормки удобрениями.

Прицепные дальнеструйные машины устроены так же, как и навесные, но на одноосном прицепе к трактору. От вала отбора мощности через карданный вал приводятся в действие насос и механизм поворот дождевального аппарата [16].



Рисунок 1.6 – ДДН-70

Дальнеструйные машины с расходами воды более 100 л/с бывают на самоходных шасси или прицепные.

Машины, работающие в движении на базе трактора. Основа двухконсольной машины – двухконсольная ферма (ДДА-100МА, рис. 1.7), установленная на гусеничный трактор. Ферма имеет два нижних водопроводящих пояса и один верхний трубчатый пояс, связанные раскосами. На нижних водопроводящих поясах установлены трубчатые открылки с дефлекторными насадками.

Воду забирают из оросителя через плавучий приемный клапан центробежным насосом, смонтированным на машине. Вода по трубе, образующей поворотный круг, поступает в трубы нижних поясов фермы, открылки и разбрызгивается короткоструйными насадками и концевыми насадками.

Для заливки воды во всасывающую трубу применяют эжекционную систему, работающую от выхлопных газов двигателя трактора.

Для того чтобы использовать дождевальные двухконсольные машины как опрыскиватели, на машине устанавливают систему опрыскивания, состоящую из бака для ядохимикатов и насоса для подачи их к насадкам.



Рисунок 1.7 – ДДА -100 МА

Самоходные многоопорные машины кругового действия имеют трубопровод, движущийся по кругу, центром которого является неподвижная опора с гидрантом сборного трубопровода. На секциях трубопровода расположены средне-струйные дождевальные аппараты кругового действия, а на внешнем

консольном конце трубопровода – дальнеструйный аппарат секторного действия для полива углов поля вне сферы действия среднеструйных аппаратов.

Наибольшую известность получила дождевальная машина подобного типа «Фрегат» (рис. 1.8).



Рисунок 1.8 – Дождевальная машина «Фрегат».

Для обеспечения равномерного полива среднеструйные аппараты имеют различные расходы в зависимости от расстояния до оси вращения трубопровода.

Водопроводящий трубопровод установлен на самоходных опорах-тележках (рис.1.9). Система тросовых растяжек в горизонтальной и вертикальных плоскостях обеспечивает жесткость конструкции. Рама каждой тележки опирается на два колеса с зацепами. На поперечине рамы крепится фланцами основной трубопровод. Вода из трубопровода под напором поступает через шланг в регулятор скорости, пропускающий регулируемый расход воды в шланг, и через клапан-распределитель в гидроцилиндр [63].

Поливную норму регулируют, изменяя скорость движения машины. Для обеспечения равномерного полива площади машина оборудована среднеструйными дождевальными аппаратами кругового действия четырех типоразмеров и одним концевым аппаратом, работающим по сектору для полива площади углов участка.



Рисунок 1.9 – Самоходная тележка «Фрегат»

На орошаемом участке машину «Фрегат» можно использовать для полива с одной или двух позиций. Перевозит машину в осевом направлении трактор-буксировщик. Технические характеристики ДМ «Фрегат» представлены в таблице 1.4.

В зависимости от конкретных условий землепользования применяют машины различных модификаций (ДМУ-А и ДМУ-Б), отличающиеся длиной и расходом (табл. 1.5); базовая модель имеет 16 опор [63].

Таблица 1.4 – Техническая характеристика дождевальная машины «Фрегат»

Наименование	Показатели
Привод передвижения машины	Гидравлический
Количество самоходных опор, шт	16 (и более)
Длина машины, м	454
Расстояние между самодвижущимися опорами, м	
с 1 по 7 опоры	24,7
с 7 по последнюю 16	29,6

Напор воды на входе в машину при максимально допустимом продолжительном уклоне, кгс/см ² (МПа)	7; (0,7)
Максимальная площадь полива при работе на одной позиции	72
Радиус полива при отключенном концевом дождевальном аппарате, м	468
Радиус струи концевой дождевальной аппаратуры, м	25
Минимальное время полного оборота машины, час	51
Минимальная поливная норма, м ³ /га	240
Количество дождевальных аппаратов, шт	50
Расстояние от поверхности земли до трубопровода, м	2,2

Таблица 1.5 – Модификации ДМ «Фрегат»

Модификация машины «Фрегат»	Число тележек	Длина, м	Расход воды, л/с, требуемое давление на входе в машину, МПа	Расход воды через концевой аппарат, л/с	Минимальная норма полива за один оборот машины, м ³ /га	Масса, т	
						без воды	в рабочем состоянии (с водой)
1	2	3	4	6	7	8	9
ДМУ-А199-28	7	199,0	28/0,47 20/0,47	5,7 4,1	137 98	6,5	10,1
ДМУ-А229-32	8	228,7	32/0,48 25/0,47	5,9 4,6	142 111	7,4	11,5
ДМУ-А253-38	9	253,4	38/0,50 28/0,47	6,4 4,7	156 114	8,2	12,7
ДМУ-А283-45	10	283,0	45/0,51 30/0,48	6,9 4,6	170 113	9,2	14,3
ДМУ-А308-30	11	307,8	30/0,48	4,3	106	10,0	15,5
ДМУ-А308-55	11	307,8	55/0,54 45/0,52	7,9 6,4	195 159	10,0	15,5
ДМУ-А337-45	12	337,4	45/0,52 34/0,50	5,9 4,6	147 114	10,9	16,5
ДМУ-А337-65	12	337,4	60/0,59 55/0,55	8,5 7,2	213 180	10,9	16,9
ДМУ-А362-50	13	362,2	50/0,54 40/0,51	6,2 5,0	155 124	11,7	18,2
ДМУ-А392-50	14	391,8	50/0,55 40/0,52	5,8 4,6	145 116	12,6	19,6
ДМУ-А417-55	15	416,5	55/0,57 45/0,54	6,0 4,9	152 124	13,4	20,8
ДМУ-Б379-75	13	379,2	75/0,57 68/0,55 60/0,53	8,6 7,8 6,9	222 202 178	12,2	20,2
ДМУ-Б409-80	14	408,8	80/0,58 72/0,56	8,7 7,8	223 200	13,2	21,9

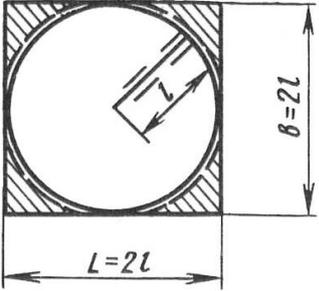
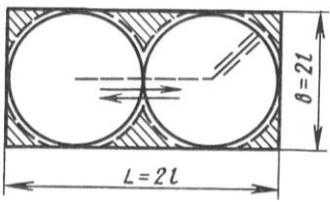
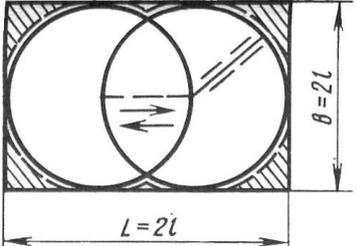
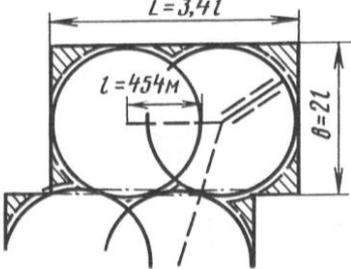
			65/0,54	7,1	181		
ДМУ-Б434-90	15	433,6	90/0,62 80/0,59 70/0,56	9,2 8,2 7,2	238 212 185	14	23,3
ДМУ-Б463-60	16	463,2	60/0,54 50/0,51	5,8 4,8	150 125	15	25
ДМУ-Б463-90	16	463,2	90/0,63 80/0,59 72/0,57	8,7 7,8 7	225 200 180	15	25
ДМУ-Б488-65	17	487,9	65/0,55 55/0,53	6 5,1	156 132	15,8	26,4
ДМУ-Б488-90	17	487,9	90/0,64 80/0,60	8,2 7,3	216 192	15,8	26,4
ДМУ-Б518-90	18	517,6	90/0,64 80/0,61 72/0,58	7,9 7 6,3	205 182 164	16,8	28,2
ДМУ-Б542-90	19	542,3	90/0,65 80/0,61 72/0,58	7,6 6,7 6,1	194 173 155	17,6	29,5
ДМУ-Б572-90	20	571,9	90/0,66 80/0,62 72/0,59	7,2 6,4 5,8	189 168 151	18,6	31,3

Многоопорные машины кругового действия отличаются высокой производительностью, обслуживают большие площади, могут работать на больших уклонах и орошают любые культуры, что обеспечивает им самое широкое применение.

Опыт эксплуатации показывает, что дождевальные машины кругового действия имеют ряд преимуществ перед другими типами машин, а именно, позволяет полностью механизировать и автоматизировать технологический процесс полива, сократить число операторов и повысить производительность труда за счет обслуживания одним оператором нескольких машин, а также производить полив в большом диапазоне поливных норм в зависимости от скорости движения.

Технологические схемы работы дождевальных машин кругового действия при орошении сельскохозяйственных культур представлены (табл. 1.6).

Таблица 1.6 – Технологические схемы работы дождевальных машин кругового действия при орошении полей севооборота [63]

Технологическая схема	Особенности работы	Преимущества	Недостатки
	<p>Машина работает на одной позиции, орошаемая площадь зависит от конструктивных параметров машины, неорошаемые углы при работе концевого аппарата составляют 16...18%, КЗИ – 0,82...0,84</p>	<p>Машина работает независимо от других, отсутствуют затраты труда и времени на перебазировки в течении вегетационного периода</p>	<p>Низкий КЗИ, минимальная сезонная нагрузка на машину, значительные капиталовложения и срок окупаемости</p>
	<p>Машина работает на двух позициях в пределах одного поля или же на смежных полях, КЗИ – 0,82...0,84</p>	<p>Увеличивается сезонная нагрузка на машину, снижаются капиталовложения и срок окупаемости. При обслуживании двумя машинами двух смежных полей сокращается время</p>	<p>Низкий КЗИ, необходимость перебазировки машины, не решена проблема полива углов</p>
	<p>Машина работает на двух позициях в пределах одного поля. Гидранты расположены на расстоянии, равном конструктивной длине машины, КЗИ – 0,91...0,93</p>	<p>КЗИ повышается до 0,91...0,93. Увеличивается нагрузка машины по сравнению со схемой I, сокращается расстояние транспортировки машины</p>	<p>Перекрытие поливом части площади поля, подача на площади перекрытия поливной нормы в два приема. Необходимость изменения скорости движения машины в процессе полива</p>
	<p>Машина работает на двух позициях на гидрантах, которые в пределах поля расположены на расстоянии, равном 1,4 конструктивной длины машины. Расстояние между гидрантами 1,925 длины машины, КЗИ – 0,91...0,93</p>	<p>На 7...8% повышается КЗИ, увеличивается по сравнению со схемой I нагрузка машины, для полива углов не требуется другая поливная техника</p>	<p>Перекрытие поливом части площади поля, на 6...7% наблюдается перерасход воды, консольная часть машины проходит над соседним полем, ухудшается возможность посадки лесополос между смежными полями</p>

Примечание: L – длина поля; b – ширина поля; l – геометрическая длина машины

1.2 Обзор конструкций дождевальных машин кругового действия, конструктивные особенности

Важным преимуществом дождевальных машин, производящих полив при движении по кругу, являются: высокая производительность и качество дождевания, возможность полной автоматизации процесса полива, более легкой приспособляемости к различным почвенно-рельефным условиям.

Кратко рассмотрим конструктивные особенности дождевальных машин кругового действия, выпускаемых основными фирмами США, Европы, России и ближнего зарубежья и направления их развития [29, 55].

Компания Valmont Industries еще в 1952 г. запатентовала самоходную дождевальную установку, имеющую возможность перемещаться вокруг центральной опоры. В дальнейшем был налажен серийный выпуск дождевальных машин кругового действия с гидравлическим приводом под маркой «Valley».

Фирмой Valmont первоначально были выпущены модели 1060 и 1076, включающие дождевальный трубопровод с тросовой подвеской на А-образных опорных тележках. В зависимости от размеров орошаемых площадей число пролетов изменялось в широких пределах. Допустимые уклоны, ограничивающие эксплуатацию этих машин, не превышали 0,05. Для орошения площадей с местным уклоном до 0,2 была создана модель дождевальной машины RG -70. Для значительных площадей была разработана модель 2076, количество тележек которой было увеличено до 20, а длина трубопровода достигала 540 м.

Для обеспечения надежности и устойчивости движения на уклонах выпускались модели дождевальных машин с ферменной подвеской трубопровода и пролетами длиной 29,6 и 38,4 м. Для работы на пониженном давлении 0,28-0,42 МПа выпускалась модель ДМ 1278 с шагом между дождевальными аппаратами, в зависимости от их типов 2,1-3,6 м. Для полива небольших по площади и неправильной формы участков была создана однопролетная ДМ 1058. За один оборот ДМ в течение семи часов поливала площадь, равную 4 га [29, 37].

На всех рассмотренных выше моделях ДМ в качестве привода применялись гидравлические поршневые двигатели, для работы которых необходимо высокое давление и очищенная вода.

В 1969-1971 годах начали создаваться ДМ с электроприводом, которые стали основными моделями фирмы. Достоинствами их стала низкая энергоемкость, автоматизация полива, надежность и простота в эксплуатации.

В моделях 2060 и 2071 был применен электрический привод, включающий электродвигатель, карданные передачи и редукторы, устанавливаемые на каждую из опорных тележек.

Для увеличения коэффициента земельного использования и полива участков прямоугольной формы фирмой Valmont выпускались модели машин 5071, 5171, 5971 с устройством для полива углов (УПУ) [29, 37]. При подходе к угловому участку поля основного крыла машины устройство для полива углов выдвигается вперед, орошая участок, и по мере прохождения угла складывается.

Для полива животноводческими стоками фирмой Valmont была разработана электрифицированная модель 7271, оборудованная специальными дождевальными аппаратами и приспособленная к работе на уклонах до 0,3.

Модель ДМ «EZ-TO» отличается конструкцией центральной опоры, имеющей свою колесную систему. Во время вращения машины и колеса центральной опоры движутся по кругу.

В настоящее время круговые оросительные установки Valley выпускаются как с фиксированной, так и буксируемой центральной опорой, длиной пролетов 43-66,7 м, трубами диаметром 127 мм, 168 мм, 219 мм, 254 мм из оцинкованной стали. В случае использования коррозионно-активной воды предлагается установка трубопровода с покрытием PolySpan [29, 37].

Для полей небольшой площади – однопролетная оросительная установка с гидроприводом Spinner, орошающая площадь до 2 га с уклоном до 2% [37].

Варианты тяговых тележек также различаются: стандартного профиля (клиренс 2,8-3 м); низкого профиля (1,85-1,95 м), высокого профиля (3,9-4 м); сверхвысокого профиля (4,9-5 м) [37].

Аналогичные направления развития электрифицированных дождевальных машин прослеживаются и у фирмы Lindsay Manufacturing («Zimmatik»).

В настоящее время фирмой Lindsay выпускаются различные модели ДМ кругового действия с шириной захвата до 800 м и диаметрами труб: 254 мм (на внутренних пролетах); 203 мм (для длинных систем – 549 м и больше); 168 мм (в системах орошения длиной 396 м и расходом воды 63 л/с); 141 мм (для коротких систем орошения с маленьким расходом воды) [33].

При этом используются оцинкованные стальные, алюминиевые нержавеющие трубы, трубы с внутренним полимерным покрытием.

Дождевальная машина Z-II «Zimmatik» для небольших полей имеет трубы меньшего диаметра 114 мм и высотой пролета 3,2 м, с клиренсом, подходящим для орошения высоких культур [33].

Для мелких производителей фирмой Lindsay была создана ДМ с гидравлическим приводом [33]. Это однопролетная ДМ, с давлением воды 0,3МПа, площадью полива до 3 га. Максимальная длина пролета 61 м, максимальная длина системы 88 м. Трубы длиной 6,7 и 13,4 м диаметром 141 и 168 мм. Клиренс 2,5 м.

Одной из наиболее востребованных в настоящее время на рынке является компания Reinke Manufacturing Company, Inc. США. Особенностью их дождевальных машин является применение С-образного металлического профиля для изготовления металлоконструкций стойки и опорных тележек. Трубы могут быть выполнены из нержавеющей стали, алюминия, хром-никеля для умеренно-агрессивной воды и сельскохозяйственных химикатов. Стандартный вариант предлагается с оцинковкой или окраской труб. Также на заказ трубопровод может быть выполнен из гальванизированной стали с высокой прочностью и защитой от коррозии или покрытием из поли-пластика для вторичной воды, или воды с чрезвычайно высоким или низким рН, а также экстремальным содержанием

хлоридов и сульфатов. Основные характеристики представлены в таблице 1.7 [35].

Представляют интерес следующие модели:

ДМ Alumigator [35] – алюминиевая круговая система, применяемая для дерновых почв, легкая, практически исключая колею.

Reinke Minigator [35] – машина для небольших и неправильной формы полей, полевых углов.

Таблица 1.7 – Основные характеристики ДМ Reinke Manufacturing Company

Тип	Модель	Диаметр трубопровода, мм	Пролеты, м											
			35,9	36,5	41,7	42,6	47,5	48,7	53,3	54,8	56,9	59,1	62,1	64,9
Высокопрочная гальванизированная сталь	E-2100	254	+	+	+									
	E-2085	219	+		+	+	+	+						
	E-2065	168	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	E-2060	152	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	E-2045	44,5	+		+		+		+			+		
Окрашенные или хром-никель гальваника	E-2665	168	+		+		+	+	+			+		
	E-2660	152	+		+		+	+	+			+		+
Алюминий	ALUM IV	152	+		+	+	+	+						
	A-80G	203	+		+		+	+						
	A-60G	152	+		+	+	+	+						
Нержавеющая сталь	S-2085G	219	+		+	+	+	+						
	S-2065G	168	+		+	+	+	+	+					
Поль-пластик гальваника	PL-2085G	219	+		+		+	+						

Фирма BAUER Gesellschaft m.b.H выпускает следующие основные модели и дает следующие рекомендации: для максимального количества секций 16: диаметры труб 254 мм, 219 мм, 168 мм; расход до 600 м³/ч; площадь полива до 220 га; стандартная высота 3,7 м. Для максимального количества секций 14: диаметры труб 203 мм, 168 мм; расход до 400 м³/ч; площадь полива до 150 га; стандартная высота 3,7 м, высокое исполнение 4,2 м.

Для максимального количества секций 8: диаметры труб 133 мм; расход до 150 м³/ч; площадь полива до 60 га; стандартная высота 3,7 м [32]. Основные характеристики представлены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Основные рекомендации ДМ Reinke Manufacturing Company

Марка Centerstar 9000 / показатели	Диаметр трубы, мм				
	133	168	203	219	254
Длина секции (пролета), м	59,8	59,8	54,0	54,0	42,3 36,4
	54,0	54,0	48,1	48,1	
	48,1	48,1	42,3	42,3	
	42,3	42,3			
Концевая балка (консоль), м	29,3; 23,4; 17,6; 11,7; 5,9				
Габаритная вы- сота, м	3,1	3,9	3,1	3,1	3,1
Колесная база, м	4,3	4,3; 5,2	4,3 5,2	4,3	4,3

Французской фирмой Irrifrance разработана и выпускается электрифицированная многоопорная дождевальная машина «Vodomatik».

Модели «Vodomatik» используется для орошения высокостебельных культур. Давление на входе в машину составляет 0,3-0,4 МПа при ее длине до 655 м. Соотношение диаметров труб и размеров пролетов представлены в таблице 1.9 [29].

Таблица 1.9 – Соотношения диаметров труб и ширины пролетов

Показатель	Пролет основной опоры				Пролет промежуточный				Консоль				
	127 141	168	193	245	141	168	193	245					
Диаметр трубы, мм													
Ширина пролета, м	47,5 54,2 61,0	47,7 54,3 61,0	47,7 54,3	40,9	47,7 54,5 61,2	47,9 54,5 61,2	47,9 54,5	41,0	7,6	14,3	21,0	27,7	

В 1971 г. по лицензии Valmont Industries в РСФСР было начато серийное производство широкозахватных дождевальных машин кругового действия с гидроприводом «Фрегат» (аналог машины «Valley», модели 1060 и 1076) [37]. Первые модели имели ограниченный диапазон использования по характеристикам почв, рельефу, энергоемкости процесса полива и другим условиям использования.

ВНПО «Радуга» совместно с СКБ ДМ «Дождь» были разработаны и внедрены в производство такие машины как «Кубань-ЛК1» и «Фрегат-Н».

Конструкция ДМ «Кубань-ЛК1» обеспечивает работу на полях:

- со спокойным рельефом (уклоны до 0,01),
- повышенным (от 0,02 до 0,05) и

– большим (от 0,05 до 0,07).

Машина начала поставляться в различных модификациях по длине и расходу воды. Число модификаций – 132. Номинальные размеры труб ферм: 203x2,65 мм; 168x2,65 мм. Для консоли: 152,4x 1,9; 102x2,5 мм. Длина – до 614 м. Во всех модификациях первой от неподвижной опоры идет головная ферма, состоящая из 4 труб диаметром 203 мм. Далее следует промежуточные фермы, предконсольные и консоль.

Орошаемая площадь – до 118,4 га. Расход 90 л/с. Максимальная потребляемая мощность – 9,6 кВт. Норма полива – 89-890 м³/га [56]. Для расширения технологических возможностей применялась с комплектом дождеобразующих устройств для экологически безопасного полива по оптимизированной схеме.

ДМ «Фрегат-Н» кругового действия с модернизированным дождевым поясом для работы на пониженном давлении. Длина машины – 199 м. Расход воды – 19,7 л/с. Давление на входе в машину – 0,37 МПа [20].

На Украине была разработана ДМ кругового действия «Фрегат» ДМФ-К с тросовой системой управления. Габаритные размеры: ширина – 6840 мм, высота – 7300 мм, дорожный просвет – 500 мм; максимальное расстояние от поверхности земли до фермы трубопровода – 3100 мм. Максимальное количество пролетов – 17. Длина машины – до 878,4 м. Расход воды – 150 л/с. Давление на входе в машину – 0,52 МПа. Площадь полива – 246,8 га. Пролеты длиной 59,9 м с диаметром труб – 168 мм и длиной консоли – 23,4 м. Пролеты длиной 48,2 м с диаметром труб – 219 мм.

В целом, как показывает российский и зарубежный опыт, все производители ведут работы над созданием таких ДМ кругового действия, которые соответствовали бы требованиям конкретного фермерского хозяйства, поля. Т.е. необходимых и задаваемых длин, расходов, интенсивностей дождя и других параметров, определяемых в зависимости от почвы, рельефа, сельскохозяйственной культуры, природно-климатических и других условий, в которых будет работать эта дождевальная машина.

Это достигается посредством изменения диаметра труб водопроводящего пояса машины, материала, расстояния между опорными тележками (пролета), типа ходовых систем, применения различных типов и схем расстановки дождеобразующих устройств и др.

Основным же требованием при разработке конструкции является обеспечение надежности и эффективности работы при минимальных затратах ресурсов.

1.3 Основные направления ресурсосбережения для дождевальных машин кругового действия

Ресурсосбережение при конструировании и эксплуатации широкозахватных дождевальных машин может касаться водных, земельных, материальных, энергетических, трудовых, финансовых ресурсов (рис. 1.10) [29].



Рисунок 1.10 – Ресурсосбережение ДМ

Водосбережение

Еще в 90-е годы прошлого века были попытки создания малоэнергоёмких и низконапорных дождевальных машин на основе ДМ "Фрегат" и ДМ "Кубань". Основной причиной данных разработок было то, что орошаемые системы с использованием высоконапорных закрытых трубопроводов и широкозахватных ДМ стали выходить со строя, требовалась реконструкция, и продлить возможность функционирования систем можно было лишь за счет перевода техники на низкое давление [29].

В настоящее время проектирование низконапорных дождевальных машин – является общей мировой тенденцией.

Так, например, как уже говорилось ранее, в настоящее время в России наиболее распространенной из многоопорных ДМ является «Фрегат», требующая согласно паспортным данным для работы, давления на входе в машину 0,6-0,7 МПа, а соответственно, на насосной станции должно быть обеспечено давление 1,0-1,2 МПа.

Большое количество исследований проводилось с целью перевода дождевальной машины на низкое давление, известно, например, что снижение давления с 0,7 до 0,45 МПа позволяет на 16 % уменьшить давление на насосной станции и на 13% годовой расход электроэнергии.

По данным Рыжко Н.Ф. [60] энергоёмкость подачи воды при поливе ДМ «Фрегат» достигает 180 кВт·ч. Отношение потребляемой мощности электродвигателя к расходу воды насосов Д1250-125 и 250QVD 570-50 составляет 1,78 и

1,2 кВт/л/с соответственно, и может достигать 2,80 кВт/л/с. При давлении на выходе насоса 0,9 МПа и его КПД равном 0,7 расход электроэнергии на перекачку 1000 м³ воды составляет 349 кВт·ч. На насосных станциях, работающих с ДМ «Фрегат», на подачу 1000 м³ воды в среднем расходуется 450-570 кВт·ч [60].

Включение и отключение дождевальных машин вызывает значительное колебание давления в закрытой сети, достигающее 1,2-1,4 МПа. Экономия электроэнергии на насосной станции и повышение надежности работы закрытой оросительной сети за счет применения дождевальных машин, работающих при низком давлении является актуальной задачей, например, в США число низконапорных дождевальных машин составляет порядка 24% и их количество с каждым годом увеличивается.

Первая ДМ «Фрегат» осуществляющая полив при низком давлении была разработана в ВНИИМиТП в 1976 году, имела расход воды 72 л/с при давлении на входе 0,41 МПа. Ее недостатком было увеличение минимального времени оборота с 52 до 86 часов и недостаточный расход воды (72 л/с). Технические характеристики ДМ, работающих на низком давлении, приведены в таблице 1.10 [60].

Общими недостатками низконапорных ДМ «Фрегат» являлись недостаточный расход воды, значительное увеличение времени полива, сложность увеличения скорости передвижения.

Таблица 1.10 – Технические характеристики серийной и низконапорных ДМ «Фрегат»

Техническая характеристика	Серийная машина	Низконапорная машина		
		ВНИИ-МиТП	СтавНИИГиМ	УкрНИИГиМ
Расход воды при нулевом уклоне, л/с	72,0	72,0	72,0	72,0
Давление на входе в машину, МПа	0,57	0,41	0,38	0,38
Площадь орошения с одной позиции, га	74,9	70,0	74,9	73,3
Минимальное время одного оборота, ч	52	86	64	90
Минимальная норма полива, мм	18,0	30,0	22,0	30,0
Количество короткоструйных насадок и аппаратов, шт	50	156	146	171

В институте ВолжНИИГиМ велись разработки по нескольким направлениям снижения давления. Перевод высоконапорных ДМ «Фрегат» на работу при пониженных давлениях позволяет экономить до 20-30% электроэнергии,

увеличивая при этом количество одновременно работающих машин в 1,5-2,0 раза. Установлено, что энергоёмкость полива низконапорных модификаций ДМ «Фрегат» может снижаться до 1098 кВт·ч/га; при этом уменьшаются потери воды, однако ухудшаются эксплуатационные характеристики машины и показатели, характеризующие качество полива, такие как интенсивность и равномерность [60].

Соотношения расхода, давления и потребляемой мощности для «Кубань-ЛК1» представлено в таблице 1.11 [56]

Таблица 1.11 – Соотношение энергетических показателей для «Кубань-ЛК1»

Модель	Количество тележек	Расход, л/с	Давление, МПа	Максимальная потребляемая мощность, кВт
МДЭК-212-20-01	4	17-20	0,4	6,1
МДЭК-260-23-01	5	22-23	0,42	6,8
МДЭК-309-35-00	6	24-27	0,43	7,5
МДЭК-358-35-01	7	32-35	0,46	8,2
МДЭК-397-55-00	8	50-55	0,31	3,7
МДЭК-435-65-00	9	60-65	0,33	4,3
МДЭК-474-70-00	10	65-70	0,35	7,5
МДЭК-512-75-00	11	70-75	0,36	8,2
МДЭК-551-82-00	12	77-82	0,39	8,9
МДЭК-589-90-00	13	85-90	0,43	9,6

По техническому уровню, качеству создаваемого дождя и энергопотреблению «Кубань-ЛК1» отвечает современным требованиям, уступая западным аналогам по металлоёмкости и возможностям автоматизации.

«Фрегат» ДМФ-К (Украина) имеет рабочее давление воды на входе в машину – 0,25-0,3 МПа, производительность по воде от гидранта – до 50-75 л/с, производительность по воде из канала – 80-90 и более л/с.

Для обеспечения движения ДМ «Фрегат» на низком давлении изменялись конструкции привода машины, в частности менялась длина плеча рычага толкателя (СтавНИИГиМ) [73], что уменьшало скорость движения машины, в результате чего увеличивалась минимальная поливная норма.

Новая модификация ДМФЕ «Фрегат» изначально адаптирована к работе при низком давлении. Рабочее давление на входе в машину 0,25-0,3 МПа при нулевом уклоне и расходе 80-90 л/с и длине машины 442 м.

Ведутся разработки ДМ «Фрегат» фронтального передвижения.

Рабочий диапазон давлений ДМ кругового действия «Valley», «Zimmatik», T-L IRRIGATON, Reinke Manufacturing Company – 0,28-0,45 МПа Снижение энергоёмкости дождевания при этом может составить от 16 до 50% [33, 35, 36].

Конструкции низконапорных дождевальных машин типа «Zimmatic», «Valley» [33] оборудуются низконапорными насадками с поливом по сектору, монтируемыми на коротких патрубках с наклоном 45° к горизонтальной плоскости. Экономия оросительной воды при этом составляет не менее 20% по сравнению с обычным дождеванием, а энергозатраты снижены – на 15-20%.

Рациональное использование водных ресурсов зависит от многих факторов, к числу основных можно отнести: равномерность распределения дождя по площади и по крупности капель [46, 60]; испарение воды и сноса ветром [60].

Многочисленные исследования и опыт эксплуатации отечественных и зарубежных дождевальных машин показывают, что применение устройств приповерхностного дождевания является основным направлением улучшения показателей полива. Это значительно снижает потери воды на испарение и снос ветром и повышает равномерность полива.

Большинство выпускаемых в настоящее время импортных многоопорных дождевальных машин комплектуется устройствами приповерхностного дождевания. Высота установки устройства регулируется от 0,45 до 3 м от поверхности почвы в зависимости от высоты сельскохозяйственных культур [32, 33, 35].

В настоящее время большинство западных компаний, таких как Lindsay, Bauer, Reinke устанавливают подвесные штанги, изготовленные из оцинкованной стали, трубы ПВХ или усиленного гибкого шланга, чтобы свести к минимуму потери воды в результате испарения и сноса ветром. Имеются различные варианты устройств приповерхностного полива с отведением от опорных тележек для обеспечения сухого хода [32, 33, 34, 36, 37].

Первые разработки устройств приповерхностного дождевания для ДМ типа «Фрегат», «Кубань-ЛК» были проведены в ВолжНИИГиМе. Был разработан ряд устройств приповерхностного дождевания, снижающих высоту подъема дождевого облака до 1,1-1,7 м над поверхностью, что обеспечило уменьшение потерь воды на испарение и снос ветром (при средних погодных условиях Саратовской области) с 10,4-22,5% до 4-10 %. При этом коэффициент эффективного полива, при средней скорости ветра 3-4 м/с находится в пределах 0,70-0,75, т.е. повышается на 20–25 % [59, 60].

Для повышения качества дождя МДЭК «Кубань-ЛК1» была оборудована комплектом для экологически безопасного полива. В сравнении с серийной машиной она обеспечивает следующие показатели: создание дождя мелкокапельной мелкодисперсной структуры с каплями диаметром 0,8-1 мм, уменьшающими ударное воздействие на почву и растения на 33%, повышение равномерности распределения дождя по орошаемой площади на 16%, увеличение достоковых поливных норм для различных типов почв, в том числе с низкой водопроницаемостью, на 25-30%, табл. 1.12 [62].

Рациональное использование водных ресурсов и повышение качества дождевания обеспечивается за счет мелкокапельной структуры дождя, его равномерного распределения по орошаемой площади, исключения лужеобразования от стока воды по поверхности орошения, а также минимальных потерь на

испарение и снос ветром, что требует дальнейшего совершенствования дождеобразующих устройств и схем их расстановки.

Сбережение земельных ресурсов.

Важнейшим показателем при орошении с точки зрения земельных ресурсов является коэффициент земельного использования (КЗИ). Чем меньше величина отчуждения под коммуникации, системы трубопроводов, колеи колес опорных тележек дождевальных машин, тем выше КЗИ [29].

Таблица 1.12 – Сравнительная техническая характеристика машины «Кубань-ЛК1» модификации МДЭК-512-75

Показатели	Серийная	С комплектом дождеобразующих устройств
Рабочее давление на входе, МПа	0,36	0,25
Расход воды, л/с	75	63
Орошаемая площадь, га	83,6	
Рабочая длина захвата дождем, м	516	
Достоковая поливная норма, м ³ /га	460	570
Средняя интенсивность дождя, мм/мин	0,7	0,45
Коэффициент эффективного полива при скорости ветра:		
0-1,5 м/с	0,7	0,81
1,5-5 м/с	0,64	0,73
Средний диаметр капель, мм	1	0,9

В конструкциях дождевальных машин, работающих по кругу трудно добиться увеличения данного показателя. Если в машине "Фрегат" в пределах орошаемого круга КЗИ=0,98, то с учетом недополива углов эта величина составляет 0,82. Недополив углов приводит к снижению урожайности на этих участках по сравнению с орошаемым кругом, а применение устройства для полива углов приводит к значительному усложнению конструкции машины, ее надежности в эксплуатации. Приспособления для полива углов позволяет поднять КЗИ до 0,94-0,95.

Для увеличения КЗИ и уменьшения воздействия ходовых систем на почву важным направлением исследований является оптимизация параметров ходовых систем, способа и конструкции крепления трубопровода, а также совершенствование автоматической системы выравнивания.

При перемещении многоопорной дождевальной машины по орошаемому полю из-за выхода ее самоходных опорных тележек из общей линии и изгиба трубопровода происходит их смещение, а соответственно увеличение площади

участка, заминаемого колесами при многократных проходах ДМ, и оказывает влияние на работу приводов в момент выравнивания.

Как показала практика орошения машинами "Фрегат" на угловых участках, не захватываемых дождем, урожай получается как на богаре и составляет примерно 50% урожая на поливных землях. Поэтому площадь потерь по урожаю принималась равной половине неорошаемой площади плюс 1% потерь от заминания [15]. Т.о. при конструировании ДМ важен способ закрепления трубопровода в пролете и обеспечение системы синхронизации движения опорных тележек.

КЗИ можно увеличить следующими способами:

- обеспечивая полив углов участка (применение устройств для полива углов, установкой дождевального аппарата на конце трубопровода, обеспечивающего полив углов при автоматическом своевременном включении);
- при рациональном планировании и организации территории полива.

Перемены в области сельского хозяйства, происходящие в последние десятилетия, характеризуются резким сокращением поливных площадей и дроблением площадей на локальные участки орошения площадью от одного до нескольких сот гектаров. Нередки случаи, когда под одной машиной возделывается несколько видов сельскохозяйственных культур. И повысить эффективность использования земли можно путем применения технологических схем с разделением участка на половины или по секторам.

Следовательно, важнейшим требованием к машине является ее реверсивность и изменение скорости и нормы полива с заданием в автоматическом режиме в зависимости от градуса прохождения по кругу (рис. 1.11).

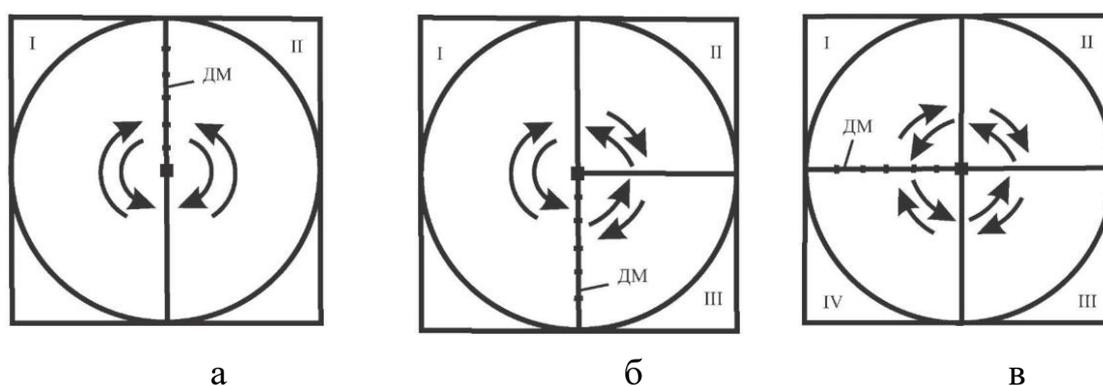


Рисунок 1.11 – Схемы полива: а – поля с двумя культурами; б – с тремя; в – четыре культуры

При различных условиях дождевание может вызывать ирригационную эрозию почв. В зависимости от типа ДМ, сельскохозяйственной культуры и уклона поля, средняя величина поверхностного стока при оросительной норме $600 \text{ м}^3/\text{га}$ может достичь 20-45% от водоподачи, что ведет ухудшению водно-физических и агрохимических свойства почв, снижается плодородие [9, 73, 74].

Помимо этого уменьшается коэффициент использования поливной воды, увеличивая затраты на ее подачу, что в значительной степени сказывается на эффективности полива. Основной причиной этого, является несоответствие режима орошения природным и агротехническим условиями орошаемого участка. При дождевании сток воды и эрозия почвы будут предотвращены, если поливные нормы не превысят достоковые, или эрозионно-допустимые [9].

Максимальный поверхностный сток возникает на ранних стадиях развития растений, на незащищенной от воздействия воды почве. Например, на ранних стадиях развития кукурузы твердый сток образуется при норме полива 200–300 м³/га, а на стадии цветения и налива зерна – при 400 м³/га.

Также причиной возникновения поверхностного стока и ирригационной эрозии, являются аварийные остановки при работе в автоматическом режиме, характерные для ДМ «Фрегат», в случае, если не предусмотрено отключение водоподдачи при остановке или пробуксовывании последней ведущей тележки, приводящее к переполивам.

Материальные ресурсы.

Серийные дождевальные машины «Фрегат», «Кубань-ЛК1» требуют значительного уменьшения материалоемкости.

Для выявления направлений конструирования ДМ нового поколения в РосНИИПМ была предложена методика, позволяющая анализировать технические показатели ДМ. Из таблицы 1.13 видно, что для организации полива ДМ «Фрегат» необходимо 39 т металла, ДМ «Кубань-ЛК1» – почти 45 т [29].

Таблица 1.13 – Относительные показатели материалоемкости серийных ДМ

Оценочный показатель	Фрегат Б 434-90	Фрегат ДМУ 199	Кубань-ЛК1
Материалоемкость, т, всего: в том числе	39,6	19,7	44,4
Насосная станция	3,8	2,9	3,8
Трубопроводы	21,8	10,3	22,4
Дождевальная машина	14	6,5	18,2
Материалоемкость, т, на 1 га площади в том числе:	0,6	1,23	0,61
Насосная станция	0,06	0,18	0,05
Трубопроводы	0,33	0,64	0,31
Дождевальная машина	0,21	0,41	0,25
Материалоемкость, т на 1л/с расхода в том числе:	0,44	0,7	0,61
Насосная станция	0,04	0,10	0,05
Трубопроводы	0,24	0,37	0,31
Дождевальная машина, в том числе	0,16	0,23	0,25

Удельные показатели металлоемкости, т/га определяются как:

$$K_{\text{уд.га}} = \frac{M_0}{F_K}, \quad (1.1)$$

где M_0 – расход металла на площадь, обслуживаемую одной машиной, т;
 F_K – нормативная площадь, обслуживаемая одной машиной, га;

$$K_{\text{уд.л/с}} = \frac{M_0}{Q_M}, \quad (1.2)$$

Q_M – нормативный расход дождевальная машины, л/с.

Рассматривая только массу самих дождевальных машин, можно сказать, что от 60 до 75% от общей массы приходится на водопроводящий пояс машины с фермой и системой тяг, и оптимизация его конструкции является весьма актуальной. На опорные тележки приходится 20-30 %.

Снизить металлоемкость ДМ можно путем замены металлических узлов и деталей на альтернативные материалы, например, полимерные.

Эффективность использования пластмассовых труб в мелиоративном комплексе обусловлена рядом свойств, например, высокой стойкостью к воздействию среды, гладкостью, что снижает гидравлическое сопротивление и увеличивает пропускную способность, легкостью (в 5-10 раз легче равных им по размеру металлических).

Наиболее близкие к стальным прочностные характеристики имеют стеклопластиковые трубы на основе эпоксидных или полиэфирных смол. Стеклопластиковые трубы во многом могут стать альтернативой стальным или алюминиевым.

Так, по исследованиям Саратовского ГАУ, по замене металлических трубопроводов дождевальной машины ДКШ-64 «Волжанка» на трубопроводы на основе реактопластов-стеклопластиков, можно сделать вывод о возможности рассматривать материал стеклопластик как альтернативу традиционным материалам при применении их в данной конструкции дождевальной машины.

В ВолжНИИГиМе совместно с научно-производственной фирмой «ПоТеХИн и К^о», ООО «Бийским заводом стеклопластиков» и ЭТИ СГТУ ведутся разработки по применению полимерных трубопроводов, в частности широкозахватная дождевальная машина (ДМ) «Бамбук». Из стеклопластика была изготовлена консоль ДМ «Бамбук» длиной 15000 мм и условным проходом 90 мм, состоящая из несущего трубопровода и вантовых растяжек [29].

Необходимо отметить целесообразность использования полимерных материалов для изготовления дождевателей, позволяющих снизить стоимость конструкции.

Энергетические ресурсы.

Одним из важнейших современных требований является экономное расходование энергоресурсов. Общие энергозатраты на один полив можно определить из формулы [64], Дж:

$$\mathcal{E}_{\Pi} = \frac{\gamma H_{\Pi} t Q_0}{\eta}, \quad (1.3)$$

где t – время полива;

H_{Π} – напор насоса, м;

Q_0 – расход, м³/ч;

η – суммарный КПД насосно-двигательной установки;

γ – удельный вес воды, $\gamma=10^4\text{Н/м}^3$.

Из формулы видно, что энергозатраты на поливе пропорциональны давлению насосной станции или установки ДМ, и отчасти характеризуют технический уровень дождевальной машины. Условием является обеспечение работы дождевальных аппаратов на конце ДМ в пределах нормативных показателей или при гидроприводе – нормальной работы приводов последних тележек.

Тогда на один гектар и один полив [64]:

$$\mathcal{E}_{\Gamma\text{А}} = \frac{\gamma m_{\Pi} H_{\Pi} \eta_{\Pi}}{\eta}, \quad (1.4)$$

где m_{Π} – поливная норма, м³/га ;

η_{Π} – к.п.д. полива.

Серийные дождевальные машины «Фрегат», и даже низконапорные ДМ «Кубань-ЛК1» достаточно энергоемки (табл. 1.14).

Таблица 1.14 – Относительные показатели энергоемкости серийных ДМ

Оценочный показатель	Фрегат Б434-90	Фрегат ДМУ 199	Кубань-ЛК1
Энергоемкость, кВт:	88,1	37,2	75,8
В т.ч. на 1 га	1,33	2,33	1,04
На 1 л/с расхода воды	0,98	1,33	1,03

Снижение потребного рабочего давления при обеспечении показателей качества работы ДМ – одно из важнейших направлений совершенствования дождевальной техники.

Энергетические затраты на перемещение ДМ зависят главным образом от характера движителя и технологии работы машины (позиционно, в движении, стоп-стартный режим).

Суммарная мощность на привод складывается из мощностей, потребляемых всеми тележками машины, и, соответственно, снижение затрат обеспечивается снижением массы, сопротивления передвижению и возможным уменьшением количества тележек.

Так, для повышения к.п.д. привода электрифицированных ДМ компании T-L Irrigation Company впервые вместо цепных передач начали применять карданные с одним мотор-редуктором [36]. Затем для исключения возникновения

«паразитных» мощностей стали устанавливать мотор-редукторы на каждом колесе тележки. При этом в редукторах использовались планетарные передачи, позволяющие в среднем увеличить к.п.д. с 50 до 90%.

Фирма «Baueer» устанавливает мотор-редуктор конструктивного исполнения: передаточное число 50:1, мощность 0,54 кВт; передаточное число 40:1, мощность 0,54 кВт; передаточное число 30:1, мощность 1,1 кВт. Колесный редуктор неподвижного исполнения: червячный 50:1 и подвижного исполнения с отцеплением червяка во время свободного хода для перестановки машины на другое поле [32].

Современные системы Zimmatic: основной электродвигатель мощностью 0,75 кВт с цилиндрической зубчатой передачей, $n=43 \text{ мин}^{-1}$ [33].

Компания Reinke устанавливает буксируемые редукторы и мотор-редукторы трех вариантов скоростей: низкий 60:1 (29 мин^{-1}); стандартный 40:1 (43 мин^{-1}); высокой 25:1 (70 мин^{-1}) [35].

«Фрегат» ДМФ-К (Украина), использует мотор-редуктор и два червячных редуктора на каждой тележке производства компании США. Мотор-редуктор «УМС Power Save 3,5»: передаточное число 40:1 мощностью 0,55 кВт; передаточное число 30:1 мощность 1,1 кВт. Колесный редуктор УМС 725-TNT-U 50:1 с выведением из зацепления для транспортного положения.

В дождевальном машине «Кубань-ЛК1» используются мотор-редукторы ЗМЦЧ-80-28-1,1У1; ЗМЦЧ-80-22-1,1У1; колесные редуктора ЭДМФ-01.2240-04, а в дальнейшем марки УМС с передаточным отношением 40:1 [56].

Учитывая то, что в отечественной практике создания ДМ снижение энергоемкости их движения и полива имеет весьма актуальное значение, необходимо является разработка собственных малоэнергоемких технических и технологических решений по машинам кругового действия при обеспечении простоты и дешевизны их выполнения.

Трудовые ресурсы.

Дальнейшее развитие технологии дождевания зависит главным образом от внедрения и совершенствования системы автоматизации дождевальных машин, позволяя исключить трудоемкие и затратные по времени ручные работы, регулировать интенсивность дождя в широких пределах, определяемых впитывающей способностью почвы, обеспечить экономию воды и труда. Можно выделить следующие основные направления развития в автоматизации ДМ кругового действия:

- повышение надежности и упрощение конструкции систем автоматизации;
- расширение функциональных возможностей, в том числе учет энергии и водопотребления, регулирование и подбор экономичных режимов в зависимости от почвенно-рельефных и метеоусловий;
- обеспечение реверсивного передвижения, регулирование скоростей и норм полива в значительных пределах, в том числе по зонам и секторам полива.

Т.о. кратко изложенные взаимозависимости характеристик ДМ позволили наметить направления совершенствования и оптимизации с точки зрения ресурсосбережения и повышения качества полива:

- ДМ на низком напоре;
- приповерхностный полив;
- разработка конструкций низконапорных дождевателей;
- оптимизация конструкции водопроводящего пояса и ферм, расстановка дождеобразующих устройств с точки зрения ресурсосбережения;
- разработка рекомендаций по выбору ходовых систем;
- оптимизация системы приводов и режима работы машины;
- совершенствование автоматической системы управления.

1.4 Особенности проектирования элементов дождевальных машин кругового действия

Металлоконструкции и водопроводящий трубопровод

Как ведущие зарубежные фирмы-производители: «Valley», «Zimmatik», «Reinke», BAUER, так и российские производители поставляют на рынок сельскохозяйственной техники дождевальные машины с идентичными конструкциями ферм для крепления водопроводящего трубопровода [32, 33, 35, 37], рис.1.12.

Ферменные конструкции большинства ДМ представляют собой трехпоясную конструкцию треугольного сечения (угольники). Верхний пояс – водопроводящий трубопровод.

Пролеты ферм состоят из водопроводящего трубопровода с различными диаметрами в диапазоне: от 150 до 250 мм. Трубопровод опирается на стержневые фермы из металлопроката с креплениями (тяги и раскосы).

Стержни крепятся к каждому узлу фермы, создавая опору для трубопровода и передавая прочность конструкции, которая требуется для работы в сложных условиях [32, 33, 35, 36, 37], (рис. 1.13).

Длина каждого пролета может быть изменена добавлением или снятием труб и ферм. Различные пролеты соединяются между собой, обеспечивая необходимую длину машины. Пролеты соединены между собой сцепным устройством (рис. 1.14), обеспечивающим горизонтальную и вертикальную гибкость соединения пролетов.

Трубы напорного пояса дождевальных машин фирмы «Reinke» [35] поддерживаются элементами, называемыми «распорки пролета» и «укосины», расположенными через каждые 5,79 м и вместе со шпренгелями образующими устойчивую конструкцию. Все шпренгели универсальны по длине и выполнены из высокопрочной стали в двух вариантах: по диаметру 5/8 дюйма (1,59 см) или 3/4

дьюма (1,90 см), в зависимости от длины и диаметра водопроводящего трубопровода.



«Valley»



Zimmatik



BAUER



Reinke

Рисунок 1.12 – Конструкции ферм

Стержни крепятся к каждому узлу фермы, создавая опору для трубопровода и передавая прочность конструкции, которая требуется для работы в сложных условиях [32, 33, 35, 36, 37], (рис. 1.13).



Valley



Zimmatik

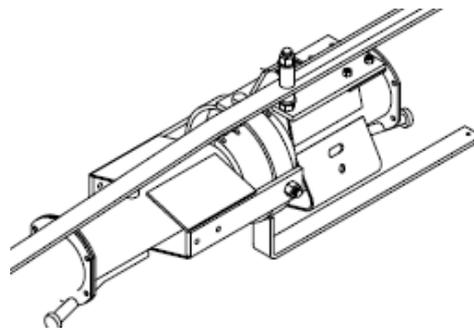


T-L

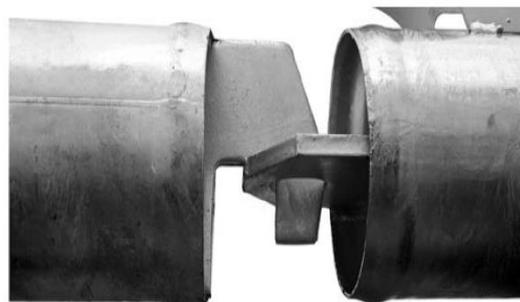
Рисунок 1.13 – Система креплений



Zimmatic



Valley



Reinke

Рисунок 1.14– Сцепные устройства

Другие производители дождевальных машин используют шпренгели, изготовленные из обычной углеродистой стали толщиной $3/4$ дюйма (1,90 см) и $7/8$ дюйма (2,22 см).

Таким образом, масса напорного пояса дождевальной машины фирмы «Reinke» в среднем на 500–1000 кг меньше, чем его аналога других производителей. Расстояния между опорными тележками подобраны с расчетом максимальной универсальности элементов водопроводящего пояса, шпренгельной системы и длин труб. Максимальная величина пролета – 64,93 м и это считается самым длинным пролетом в индустрии с одноточечной схемой крепления шпренгелей.

В ДМ «Zimmatic» используются водопроводящие трубопроводы диаметрами от 114 до 254 мм с утолщенными стенками [33]. Шпренгельные соединения «V-Jack» с коваными головками, установленные в гнезда кронштейна, повышают прочность и устойчивость каждого пролета. Перекрестные поперечины соединяют пролет со следующей тележкой, поглощая напряжение кручения при работе на неровной поверхности. Соединение пролетов обеспечивается шарниром, которое придает системе гибкость без напряжений на уклонах до 30 % .

Внешний монтаж всех компонентов не создает сопротивление потоку воды. Приспособление работает в качестве поддерживающей конструкции между пролетами, позволяя проводить замену муфты и кожуха без крана. В конструктивном исполнении шпренгельные соединения ферм дождевальных машин фирмы «Valley» [37], «T-L» [36] и «Zimmatic» [33] идентичны.

Анализируя ферменную конструкцию «Кубань-ЛК1» можно отметить низкую унификацию и универсальность узлов и деталей, наличие в одном пролете нескольких труб различной длины и разного рода креплений, затрудняющих изготовление и сборку конструкции [56] (рис. 1.15).

Дождевальная машина кругового действия «Фрегат» ДМФ-К также имеет ферменную конструкцию, вращающуюся вокруг неподвижной оси. Водопроводящий трубопровод представляет собой сборную конструкцию из пролетов-ферм, шарнирно соединенных между собой, и консоли, жестко закрепленной к концевой тележке тросовыми растяжками (рис.1.15).

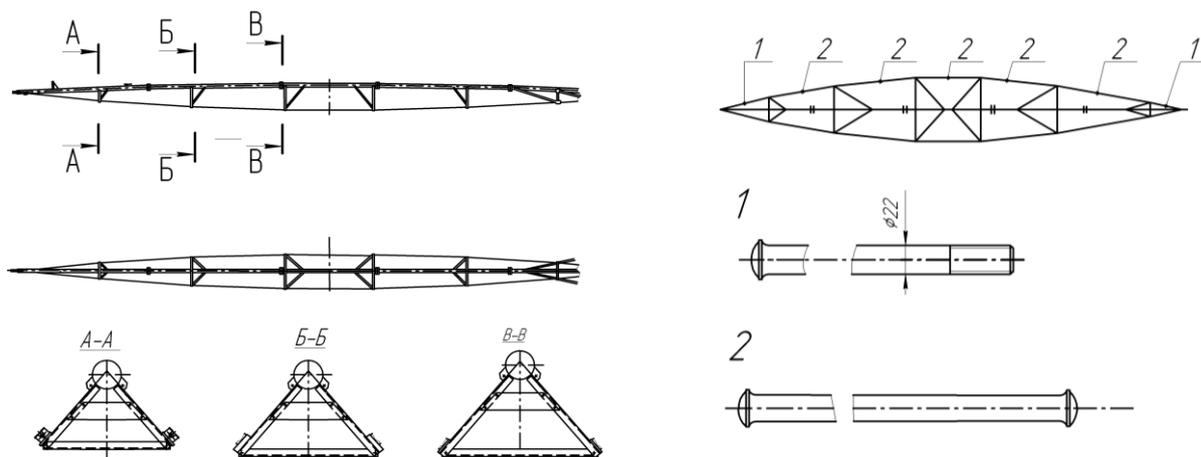


Рисунок 1.15 – Ферма «Кубань-ЛК1»

Ферма представляет собой сборную, предварительно напряженную конструкцию, состоящую из труб, тяг и уголков.

В ферменных пролетах водопроводящего трубопровода базовых модификаций ДМФ-К-А применяются трубы диаметром 168 мм, длина пролета 59,5 м. В ферменных пролетах базовых модификациях ДМФ-К-Б в начале машины применяются трубы диаметром 219 мм, а последние три пролета состоят из труб диаметром 168 мм. При этом длина пролета из труб 219 мм составляет 48,2 м, а из труб диаметром 168 мм – 59,5 м.

Анализ вариантов ферменных конструкций позволяет в качестве направления совершенствования выделить следующее: повышение универсальности и унификации элементов фермы и водопроводящего трубопровода и снижение металлоемкости.

Ходовые системы

Движение многоопорных ДМ осуществляется посредством взаимодействия движителей опорных тележек с почвой, которая является одновременно объектом увлажнения и несущим основанием.



Рисунок 1.16 – Ферменная система ДМФ-К «Фрегат»

Показатели режима полива ДМ, равномерность распределения слоя дождя по длине машины и по всей орошаемой площади также определяют механические и прочностные характеристики почвы.

Кроме этого основными показателями физических свойств почвы, определяющими ее несущую способность, а, соответственно, опорные и тягово-сцепные свойства машин, является механический состав, удельный и объемный вес, водопроницаемость и влажность.

Причем из всех показателей наибольшее влияние на механические характеристики почвы имеет влажность. Особенно выражен этот процесс при работе ДМ с большими поливными нормами, когда почва на глубине 0,2-0,3 м увлажняется до предела текучести и при взаимодействии колес с почвой происходит уплотнение, а пластическое течение ее под колеса и выпирание в стороны. Особенно резкое возрастание глубины колеи наблюдается на пахоте при увеличении поливной нормы в интервале от 200 до 400 м³/га [61].

Интенсивность процесса колееобразования и снижения сцепных свойств ходовых систем ДМ еще в большей степени увеличивается при наличии в зоне движения ходовых тележек свободной, не впитавшейся воды, вызывающей

образование стока по колею. Особенно этот процесс заметен у машин с гидроприводом, типа «Фрегат», когда к основному слою осадков (поливной норме), особенно при его больших значениях, прибавляется слой осадков от слива воды. Так, прибавка слоя воды от слива величиной около 6 мм ($60 \text{ м}^3/\text{га}$), вызывает увеличение глубины колеи до 0,12 м [61].

Наиболее сложные условия для работы широкозахватных дождевальных машин кругового действия создаются на пересеченном рельефе, низинах, на глинистых малопроницаемых почвах, когда вода практически не впитывается и не стекает по поверхности, длительное время застаиваясь на поверхности. Такое же явление наблюдается и на песчаных почвах, залегающих на глинистых породах. Эффективность применения широкозахватных ДМ из-за значительного колееобразования отдельных опорных тележек значительно снижается даже на орошаемых полях при работе с малыми нормами полива.

Аналогичные случаи могут наблюдаться не только для пересеченного рельефа, но и вследствие неоднородности почвы, при работе с большими поливными нормами на ровных площадях полива.

Необходимо отметить, что явление переполива и образования стоков наблюдается и по длине машин из-за конструктивных особенностей водопроводящего трубопровода и особенностей схем расстановки на нем дождевателей и имеет разные значения.

Как показывает опыт эксплуатации для широкозахватных дождевальных машин кругового действия, глубина колеи имеет несколько большее значение в начале и в конце машины, соответственно из-за увеличенного слоя осадков (расхода) и повышенной интенсивности дождя (образование стоков) (рис. 1.17).

Эта особенность четко прослеживается на сложном рельефе при испытании машины «Фрегат».

Применение на машинах одного типа дождевальных устройств и схем их расстановок привело к необходимости создания очень большого количества модификаций ДМ по расходу и длине для различных климатических зон страны, что не является рациональным.

Как показывает зарубежный и отечественный опыт эксплуатации многоопорных широкозахватных дождевальных машин, для повышения опорно-тяговых и сцепных свойств применяется оснащение их пневматическими шинами низкого давления, сдвоенными колесами, трехколесными ходовыми системами, уширенными жесткими колесами, гусеничными и шагающими движителями.

Согласно проведенному анализу, 90% ДМ оборудуются колесными системами. Ограниченность применения гусеничных и шагающих ходовых систем обуславливается сложностью конструкции, трудностью в обслуживании и ремонте, повышенной стоимостью. В ВНПО «Радуга» была сделана попытка создания на базе серийных жестких колес ДМ «Фрегат» гусеничных движителей применительно для работы на одной и двух позициях [61]. Разработка не получила распространения, в связи с трудоемкостью эксплуатации движителей и их низкой надежности при незначительном уменьшении колееобразования.

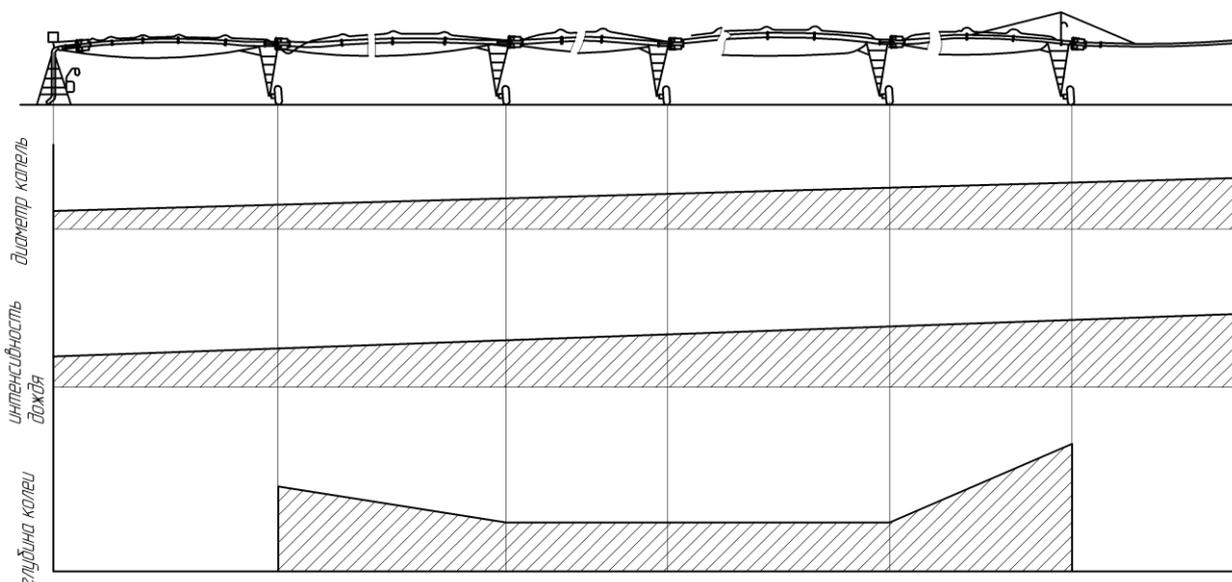


Рисунок 1.17 – Типичное изменение показателей качества и колееобразования по длине ДМ кругового действия

Из шагающих типов движителей представляет интерес разработка для дождевальная машины типа «Фрегат» Саратовского института механизации сельского хозяйства также не получившая распространения из-за сложности изготовления и низкой эксплуатационной надежности. В настоящее время в ВолгГТУ разработан и испытан ряд опытных образцов шагающих машин, предназначенных для работы на слабых грунтах [29].

В настоящее время ДМ «Фрегат» оснащаются пневматическими шинами.

В целях повышения проходимости широкозахватных дождевальных машин зарубежные фирмы для своих ранних разработок применяли жесткие колеса с уширенным ободом. Например модели 1260, 1176, 1658 и др. фирмы Valmont [37].

Краткая характеристика шин, устанавливаемых в настоящее время на многоопорных ДМ в США, приведены в таблице 1.15 [32, 37].

Таблица 1.15– Технические данные шин ДМ производимых в США

Марка шины	10-20	11-24,5	11,2-24	12,4-24	14,9-24	16,9-24
Обод	-	8,25-24,5	10,4-24	-	12,0-24	15,0-24
Норма слойности	-	10-12	4	-	-	-
Площадь контакта	-	0,06	0,07	-	0,11	0,17
Исполнение	Бескамерная стандартная		Бескамерная повышенной проходимости		Бескамерная сверхнизкого давления по спец. заказу	

Наиболее применяемыми шинами для ДМ «Valley» и «Zimmatik», в зависимости от условий эксплуатации являются шины 11,2-24; 14,9 и 16,9-24, имеющие углы наклона грунтозацепов 30 и 45°, широкий протектор с открытым по центру рисунком.

Пневматики обладают высокой износостойкостью, высокими тяговыми характеристиками, сопротивлением ударам и проколам, устойчивостью против откатывания назад и проскальзывания [33].

В настоящее время фирма BAUER выпускает ДМ с шириной колесной базы 4,3 м (стандарт) и 5,2 м для тяжелых топографических и климатических условий с шинами 14,9-24; 16,9-24 и 12,4-38 [32].

Особенностью некоторых моделей Reinke – трехколесные системы, при этом размеры шин могут быть выбраны из ряда 11-22,5; 11,2-24; 14,9-24; 16,9-24; 11,2-38; 13,6-38 (рис. 1.18) [35].



Рисунок 1.18 – Трехколесные ходовые системы Reinke

Компания Lindsay (Zimmatic) устанавливает следующие типы шин: 11,2-24 (для работы ограниченное количество часов на песчаных почвах); 11,2-38 (увеличенный просвет и проходимость по узкой колее); 14,9-24 (для тяжелых и длинных пролетов); 16,9-24 (для длинных пролетов и лучшей проходимости [33], табл. 1.16.

Таблица 1.16 – Характеристика шин на ДМ компании Lindsay (Zimmatic)

Размер шин	Ширина протектора, см	Диаметр, см	Площадь контакта, см ²
11,2-24	26,4	109,2	1561
11,2-38	28,4	144,8	2084
14,9-24	36,8	126,5	2232
16,9-24	42,9	134,6	3439

Для труднодоступных районов Lindsay также использует строенную систему колес, спаренные колеса или гусеничные системы (рис. 1.19) [33].

«Фрегат» ДМФ-К (Украина) оборудуется пневматическими колесами с шинами 14,9-24 и передает удельное давление на грунт:

- для мягких грунтов (пахота) – до 0,05 мПа;
- для твердых грунтов (луг, посеvy многолетних трав) – до 0,155 мПа.

На ДМ «Кубань-ЛК1» устанавливались пневматические колеса с пневматическими шинами 18,4-24 и 16,9-24 [56].

Анализ развития ходовых систем многоопорных ДМ показал, что для повышения проходимости многоопорных широкозахватных ДМ целесообразно оборудовать колесными системами с низким уплотняющим воздействием и необходимы соответствующие теоретико-экспериментальные исследования по обоснованию их параметров.

Как показал проведенный анализ, выбор ходовых систем производился без достаточного изучения характеристик орошаемых поверхностей и колееобразования, отсутствуют также исследования рациональных соотношений длин пролетов и диаметров трубопроводов, конструктивно-высотных свойств.

Зарубежными фирмами-производителями дождевальных машин практикуется уменьшение весовых характеристик пролетов посредством выполнения из более легких материалов и изменения диаметра и длин труб [32, 33, 36].

На показатели работы широкозахватных ДМ кругового действия, кроме прочностных показателей почвы, существенно влияет рельеф орошаемой поверхности.

Оценка рельефа необходима на стадии проектирования, а затем последующего выбора модификации или компоновки машины, оценки необходимой жесткости и гибкости трубопровода, длины пролетов, конструктивного исполнения сцепных устройств, допустимого агротехнического просвета, требуемой мощности движителей тележек, их буксования, скорости движения, а также обеспечения требуемых режимов полива

Т.о. необходимо оптимизировать параметры длин пролетов ДМ, конструктивно-высотных свойств, диаметра водопроводящего трубопровода, определяемых в целом рельефными условиями орошаемых площадей, высотой растений, характеристиками почв и норм полива.

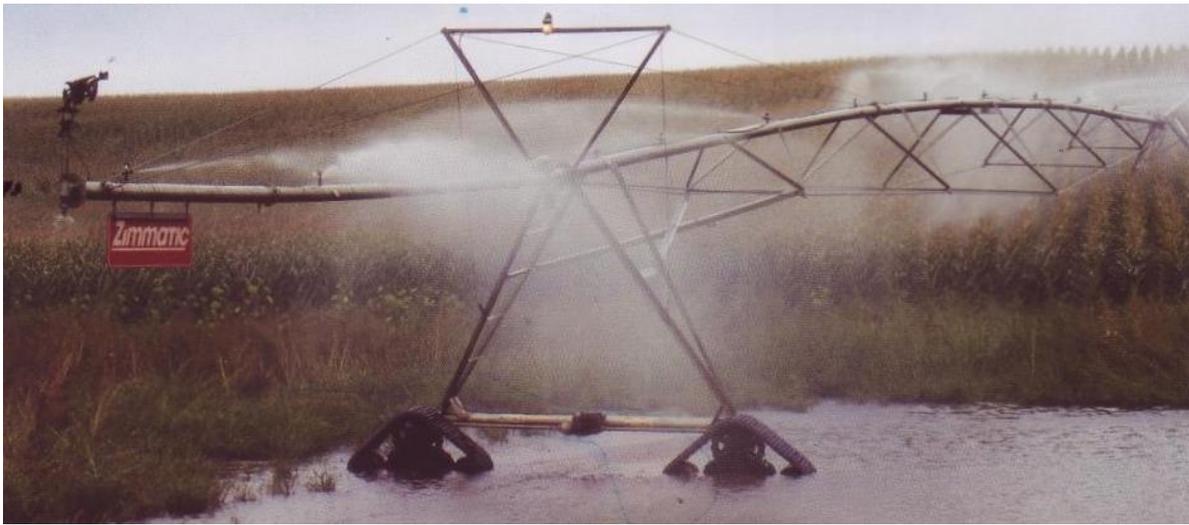


Рисунок 1.19 – Ходовые системы ДМ компании Lindsay (Zimmatic)

Системы автоматизации и управления

За последнее десятилетие системы управления и контроля за работой дождевальными машинами интенсивно развиваются в направлении автоматизации, экономии энергетических, водных и других ресурсов, увеличения количества

одновременно выполняемых задач дождевальной техникой и изменения их режимов работы в режиме реального времени.

В настоящее время разработано достаточное количество разных модулей, блоков и систем управления дождевальными машинами. Наиболее широко используемыми в нашей стране и за рубежом являются системы управления фирм-производителей, таких, как «Reinke», «Valley» и «Zimmatic».

Дождевальные машины «Valley» позволяют орошать участки разной, включая неправильной формы площадью от 2 до 21 га, осуществлять полив нескольких полей в соответствии с требуемым режимом и животноводческими стоками, вносить минеральные удобрения с поливной водой [37].

Система управления машиной «Valley Cams™» (рис. 1.20) обеспечивает автоматическое программное управление выдачей нормы полива, концевыми устройствами полива углов, секторным поливом с реверсом машин, связь по радио или телефонной линии с центрального пульта управления, сотового телефона или местного пульта, установленного на машине.

Система управления совместима с ПО «Windows» и другим программным обеспечением. Базовая центральная система управления, расположенная на пульте дежурного оператора имеет возможности мониторинга, управления ДМ и составления отчетов, выдачу сообщений о сбоях на экран, слежения за работой насосной станции. Система управления может быть обеспечена с карманного ПК (программируемого контроллера).

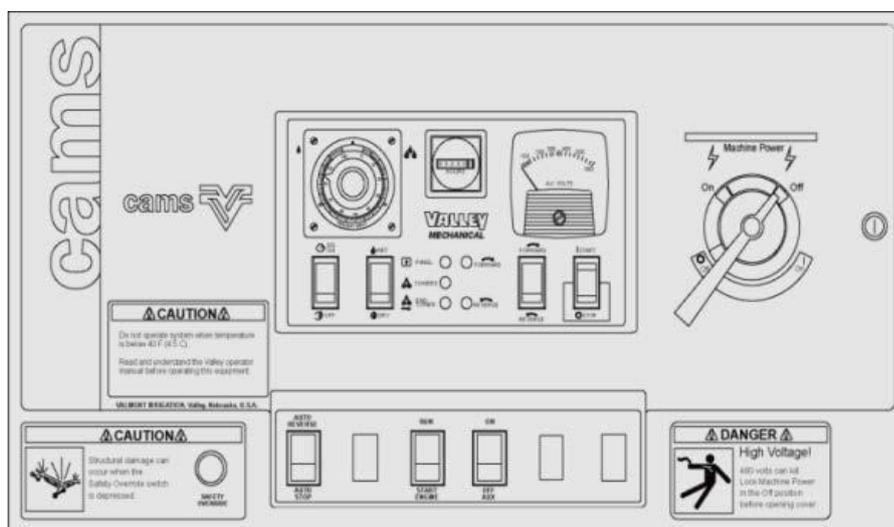


Рисунок 1.20 – Пульт управления дождевальной машины «Valley»

Для управления объектами полива фирмы «Rain Bird», «Nelson», «Hunter» и др. выпускают контроллеры для управления клапанами, двигателями, насосами по программе от датчиков дождя, метеостанций по проводным линиям связи, радиоканалу, спутниковой и сотовой связи [39, 40].

Панель управления «BASIC» фирмы «Zimmatic» [33] (рис. 1.21 а) включает в себя следующие опции:

- светодиодные системные индикаторы, предоставляющие текущую информацию о необходимых параметрах работы;
- регулирование работы насосных станций и направления движения;
- полупроводниковый таймер процентной нормы, управляющий скоростью движения дождевальнoй машины;
- устройство контроля электрической системы.

Компьютерная панель управления «VISION» (рис. 1.21 б) мгновенно предоставляет всю необходимую информацию:

- отображает границы поля дождевальнoй машины кругового действия, ее местонахождение и близость к границам или точкам остановки;
- отображает рабочее состояние используемой дождевальнoй машины кругового действия;
- средства управления функциями (смена направления движения, регулировка вспомогательного оборудования и подачи воды, изменение нормы полива и программирование остановок).

Система управления орошением «BOSS» (рис. 1.21 в) включает следующие опции:

- функцию регулировки подачи воды в зависимости от потребностей поливаемой культуры;
- функцию настройки интенсивности дождя в зависимости от впитывающей способности почвы;
- функцию управления вспомогательным оборудованием для внесения химикатов и удобрений;
- функцию планирования орошения, осуществляемую программно для нескольких сельскохозяйственных культур, частичного прохождения круга, различных свойств почвы и особенностей микрорельефа орошаемого участка;
- функцию самодиагностики, определяющую проблемы и неисправности и снижающую время простоя до минимума.

С помощью системы управления «Precision Management (RPM)» фирмы «Reinke» [35] ведется контроль за скоростью передвижения машины, направлением движения, подачей воды и функцией автостопа-автостарта.

Панель управления «RPM PREFERRED» оборудована специальным RAMS-компьютером, который легко программируется, запоминает до 1000 событий и до 64 операций для одного оборота машины.

Данный блок соединяется USB-кабелем с ноутбуком, а также имеется опция подключения связи с мобильным телефоном и дистанционного управления «OnTrac®».

Данный блок соединяется USB-кабелем с ноутбуком, а также имеется опция подключения связи с мобильным телефоном и дистанционного управления «OnTrac®».

Использование системы «Reinke Navigator® GPS» позволяет панели управлять концевым дождевальным аппаратом и крылом дополива углов с достаточной точностью до 3 м².

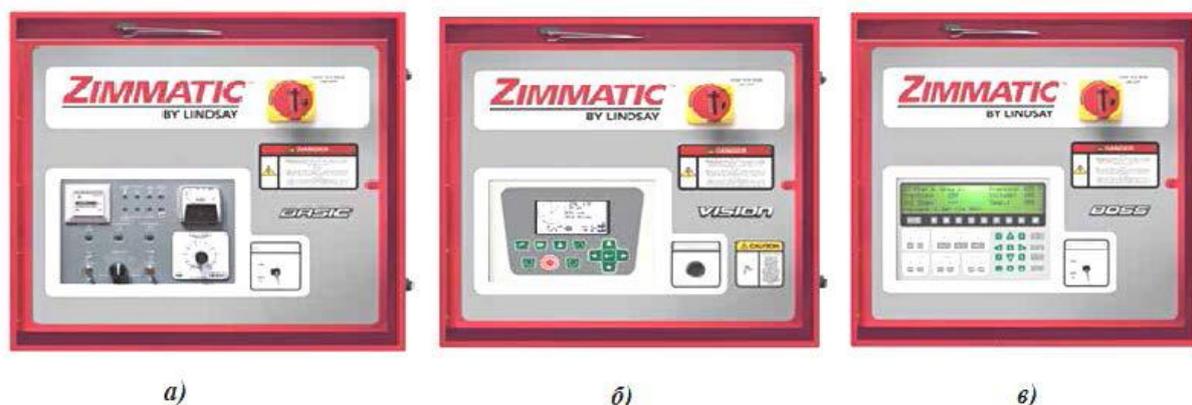


Рисунок 1.21 – Панели управления фирмы «Zimmatic»:
а) «BASIC»; б) «VISION»; в) «BOSS»

Панель управления «RPM Preferred Touch Screen» оборудована компьютером на основе Windows™, с помощью которого имеется возможность:

- графического отображения данных о машине и показаниях датчиков;
- наблюдения и записи показаний метеостанции (осадки, температура, скорость ветра и т. д.);
- программирования и корректировки настройки концевого дождевального аппарата, мест остановки и барьеров;
- программирования сектора для выполнения полива в нужное время и при определенных условиях.

В настоящее время развивается оперативное планирование поливов на основе информационно-советующих систем.

Внедряются автоматические системы, программные технологии в ВНИИ «Радуга» и СГАУ им. Вавилова Н.И. Разработанная ВНИИ «Радуга» информационно-советующая система рассчитывает рациональные нормы водопотребления с использованием компьютерных моделей, учитывая влажность почвы, температуру и влажность воздуха, скорость ветра, осадки.

Основное направление развития автоматизации ДМ – полный контроль над процессом полива и без выездов обслуживающего персонала в поле для проверки машин и оборудования, что позволяет значительно повысить производительность, сократить простои и сэкономить ресурсы.

Таким образом, основными требованиями для системы контроля и управления ДМ в базовом исполнении должны быть [29]:

- регулирование работы насосных станций и направления движения;
- таймер процентной нормы, управляющий скоростью движения дождевальной машины;

- функция планирования орошения, осуществляемая программно для нескольких сельскохозяйственных культур, частичного прохождения круга;
- функция самодиагностики, определяющая проблемы и неисправности и снижающую время простоя до минимума.
- системные индикаторы, предоставляющие текущую информацию о необходимых параметрах работы;
- устройство контроля электрической системы.

1.5 Качество полива. Дождеобразующие устройства

Показатели качества дождя

Качество создаваемого дождя зависит от конструкции и расстановки дождевателей. Дождь с различными характеристиками по-разному влияет на впитывание воды в почву и образование стока.

Основными характеристиками можно назвать следующие:

- слой осадков;
- мгновенная и средняя интенсивность дождя;
- равномерность полива – распределение слоя осадков по площади полива, которая оценивается коэффициентами эффективного полива $K_{ЭП}$, избыточного полива $K_{ИЗП}$, недостаточного полива $K_{НП}$.
- диаметр капель дождя;
- потери воды на испарение и снос ветром;
- средняя и действительная мощность дождя.

Кратко рассмотрим взаимодействие некоторых показателей. На урожайность сельскохозяйственных культур влияет равномерность распределения слоя осадков. Дождевальные машины должны обеспечивать орошение полей равномерно с коэффициентом эффективного полива не ниже 0,7 [29].

Дождь, создаваемый дождевателем, является полидисперсным; по мере удаления от сопла дождевателя происходит перераспределение массы дождевой воды в сторону крупных капель, не изменяя при этом характер распределения.

В качестве показателя оценки крупности капель наиболее часто используется медианный по объему диаметр, связанный с интенсивностью дождя, расходом дождевой воды, нормой полива и меньше зависящий от сноса капель ветром, испарения и других внешних условий, объективно отражающий характер распада струи на капли.

Физический смысл его заключается в том, что половина объема (массы, интенсивности) дождя выпадает в виде капель малого диаметра, а половина – в виде капель большого диаметра.

Математическую зависимость можно выразить следующим образом [49]:

$$\sum_{i=1}^{N_M} p_{vi} \cdot \Delta d_K = 0,5, \quad (1.5)$$

где p_{vi} – вероятность образования капли соответствующего размера.

N_M – количество интервалов, соответствующих медианному значению диаметра d_M ;

Δd_K – длина интервала.

Для оценки дождя характер изменения медианного d_M и среднеобъемного d_K диаметров капель вдоль радиуса полива r_{II} применяется зависимость:

$$d = a_n r_{II}^2 + b_n r_{II} + c, \quad (1.6)$$

где параметры параболической зависимости изменений среднеобъемного диаметра: $a_n = 0,0018-0,005$, $b_n = 0,01-0,09$, $c = 0,66-1,16$; медианного: $a_n = 0,015-0,15$, $b_n = 0,03-0,26$, $c = 0,63-2$.

Связь медианного и среднекубического диаметра капель:

$$d_M = k_M d_K + c_0, \quad (1.7)$$

При исследовании дождя параметры данной взаимосвязи лежат в пределах $k_M = 1,1-3,4$ и $c_0 = 0-1,2$ мм.

Количество выпавших капель N можно определить через показания дождемера – время регистрации t_d , объем воды V_d , приемную площадь S_d и через средневзвешенный объем капли v_K по формуле (шт):

$$N = \frac{V_d}{v_K}, \quad (1.8)$$

Средневзвешенный объем капли v_K , m^3 , определяемый каплемером:

$$v_K = \frac{\pi}{6n_i} \sum d_i^3, \quad (1.9)$$

где n_i , d_i – количество капель, диаметр капель i -го класса, измеренных каплемером или с помощью фильтровальной бумаги другими устройствами контроля.

При изучении принципов образования дождевого облака и его влияния на разрушение структуры почвы было установлено, что средний диаметр капель дождя изменяется от 0,7 до 2,4 мм, в то время как, согласно требованиям, средний диаметр капель дождя не должен превышать 1,5 мм [65].

При этом установлено, что например, у дождевальных аппаратов, установленных в начале водопроводящего пояса ДМ «Фрегат» средний диаметр капель дождя составляет 0,2-0,4 мм, а в конце – увеличивается до 1,6-2,2 мм [48, 60].

На равномерность влияют следующие показатели: скорость и направление ветра, степень дисперсности струй и их перекрытия, колебания давления в закрытой сети, рельеф поля и др.

Интенсивность также изменяется в значительных пределах. Так в начале водопроводящего пояса дождевальной машины «Фрегат» средняя интенсивность дождя колеблется от 0,06 до 0,12 мм/мин и увеличивается в конце машины на 0,46 мм/мин при слабом ветре [60].

Существенное энергетическое воздействие на почву и сельскохозяйственные культуры оказывают размер капель, мощность и удельная мощность дождя, кратность поливов.

Мощность дождя – это энергия W дождевого потока, действующая в единицу времени t :

$$N_{\text{д}} = \frac{W}{t}, \quad \text{Вт} \quad (1.10)$$

Удельная мощность дождя имеет вид [109], Вт/м²:

$$N_{\text{уд}} = 0,0083\rho_{\text{ср}} \sum_{i=1}^n (n_i V'_{\text{ки}})^2 = 0,14\rho_{\text{ср}} d_{\text{к}}, \quad (1.11)$$

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

n_i – доля капель i -го размера;

$V'_{\text{ки}}$ – скорость падения капель i -го размера.

При повторном поливе в центре машины «Фрегат» образовавшийся сток составляет 13–17 %, в конце трубопровода он увеличивается до 16–22 % [60]. 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», 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 [60].

Исследования всех авторов показывают, что объем стока повышается по мере приближения к последней тележке машины, а также с увеличением кратности поливов. В Саратовской области аналогичные результаты получены учеными ВолжНИИГиМа (полив машиной «Фрегат» темно-каштановых и каштановых почв [60]).

Таким образом, в настоящее время имеется значительный фактический материал по качеству полива широкозахватными ДМ кругового действия. Установлены недостаточная равномерность полива дождевателями при ветре и значительные величины потерь воды на испарение и снос.

В конце водопроводящего пояса ДМ интенсивность и крупность капель дождя достигают значительной величины, вызывая сток и эрозионные процессы. Поэтому разработка новых дождевателей с целью улучшения качественных показателей полива, повышения равномерности полива, уменьшения крупности капель и действительной интенсивности дождя, снижения величины потерь воды на испарение и снос ветром, а также схем их расстановки вдоль водопроводящего пояса машины является своевременной и актуальной задачей.

Анализ дождеобразующих устройств

Определимся с терминологией. Дождеобразующим устройством назовем комплекс изделий и устройств, установленных от водовыпускного отверстия трубопровода, до непосредственно дождевателя. Т.е. в него входят устройства

приповерхностного дождевания в виде штанг или гибких водоподающих спусковых трубок, муфты и штуцеры, утяжелители и регуляторы давления.

Анализ литературных источников показывает, что на широкозахватных дождевальными машинах кругового действия применяются дождеватели различных типов.

К ним относятся: среднеструйные дождевальные аппараты «Фрегат» №№1, 2, 3, 4 и 5; насадки секторного полива (СибНИИГиМ, УкрНИИГиМ, ЮжНИИГиМ и ВНИИ «Радуга»); насадка грибкового типа (СтавНИИГиМ); насадка центробежная (ВНИИ «Прогресс»); дождеватель типа «сегнерово колесо» (ВНИИ «Радуга»); насадка щелевого типа (ВИСХОМ); насадки дефлекторные (ВНИИГиМ и ВолжНИИГиМ) [49, 60, 76].

Проведем анализ конструктивных особенностей, преимуществ и недостатков применяемых дождевателей различных типов.

Серийные дождевальные машины «Фрегат» изначально комплектовались среднеструйными дождевальными аппаратами (СДА).

Достоинством среднеструйных дождевальных аппаратов «Фрегат» является значительный радиус полива (изменяющийся от 10 до 25 м в зависимости от расположения на трубопроводе), низкая средняя интенсивность дождя (от 0,05-0,40 мм/мин) [59, 60] и высокая равномерность полива.

Недостаток серийных дождевальных аппаратов – высокая стоимость и большая крупность капель дождя. Средний диаметр капель вдоль машины «Фрегат» изменяется от 0,8 до 1,7 мм, а в конце струи его значения достигают 2,0-3,5 мм [60], что оказывает негативное воздействие на сельскохозяйственные растения и почву, разрушая и уплотняя ее. Мгновенная интенсивность дождя также изменяется вдоль трубопровода машины «Фрегат» в границах от 1,2 до 2,6 мм/мин [60].

Высота подъема дождевого облака составляет 5-8 м, что увеличивает возможность сноса. Кроме вышперечисленного среднеструйные дождевальные аппараты отличаются ненадежностью работы и высокой вероятностью засорения.

Для интенсификации распыления струй известны устройства постоянного и периодического действия. К устройствам постоянного действия можно отнести: дефлекторные рассекатели или отражатели, насадки специальных форм, а также дополнительные стволы для создания многоструйности. К устройствам периодического действия относятся прерыватели кругового и гребенчатого типа [19, 60]. Повышения устойчивости струй к ветру можно добиться за счет снижения угла вылета струи к горизонту, дисперсности факела распыла и частоты вращения [60].

По сравнению с дождевальными аппаратами, применение дождевателей в виде дефлекторных насадок требует более частое их расположение на трубопроводе, поэтому вопрос снижения их стоимости стоит достаточно остро.

Так, например, число насадок конструкции СибНИИГиМ на дождевальной машине «Фрегат» составляет 159 штук, вместо 49 среднеструйных дождевальных аппаратов [60].

Насадка «грибкового типа», разработанная СтавНИИГиМ [60] создает тонкую пленку распыла, распадающуюся на мелкие капли. К недостаткам можно отнести большую вероятность засорения мусором, частые поломки края насадки; сложность регулировки расхода.

Секторные дождевальные насадки работают на машине «Фрегат» при давлении 0,6-0,7 МПа, и для обеспечения требуемого расхода воды, диаметр сопла насадок в начале дождевого пояса машины составляет 1,5-2,0 мм, что способствует образованию мелкокапельной водяной пыли, подверженной воздействию ветра и испарению. Они также подвержены частому засорению.

Центробежные насадки применяются в РФ и на Украине на дождевальных машинах типа ДДА-100М и ДДА-100МА [60]. Особенностью их является невысокий коэффициент расхода воды ($\mu = 0,27...0,30$) и формирование мелкокапельного дождя. Основным недостатком является небольшой радиус захвата дождя (не более 6 м), а соответственно большая интенсивность.

Дождеватель типа «сегнерово колесо» разработан во ВНИИ «Радуга» для широкозахватных дождевальных машин «Коломенка». Основными недостатками таких дождевателей являются большая металлоемкость, значительные затраты на монтаж и демонтаж.

Основными дождевателями, применяемыми на российских и импортных дождевальных машинах, являются (рис. 1.22) Komet KPS (низкого давления для бережного полива), Komet Twister (низкое давление до 0,14 МПа для почв с низкой скоростью инфильтрации); Senninger Superspray (увеличенное расстояние между соплом и дефлекторной пластинкой упрощает очистку и монтаж), Senninger LDN (для полива при небольшом ветре); Senninger i-Wob (с вращаемой дефлекторной пластиной, обеспечивающей большой радиус полива и низкую интенсивность дождя) [34].

Основными направлениями совершенствования дождевателей фирмы Komet Innovative Irrigation являются:

- равномерное распределение воды;
- постоянный диаметр капель;
- энергоэффективность;
- надежность.

Представляет интерес дождеватель «Komet 3-D Система движения», предназначенный для давлений 0,04-0,14 МПа с диаметрами сопла 2-10,3 мм, обеспечивающий дополнительные колебательные движения, что увеличивает диаметр зоны увлажнения (рис. 1.23).

Наиболее часто применяемыми в настоящее время как зарубежными, так и российскими компаниями – производителями дождевальных машин являются дождеватели фирмы Nelson Irrigation: Rotator (согласно рекомендациям производителей – большой радиус, равномерное орошение, низкие нормы полива для

экономии воды и энергоресурсов); Accelerator (высокая равномерность); Spinner (для чувствительных культур и почв); Sprayhead (рассекатель, обеспечивающий большую ветроустойчивость); Orbitor (повышенная ветроустойчивость, меньшая засоряемость).



Рисунок 1.22 – Основные дождеватели Российских и импортных ДМ

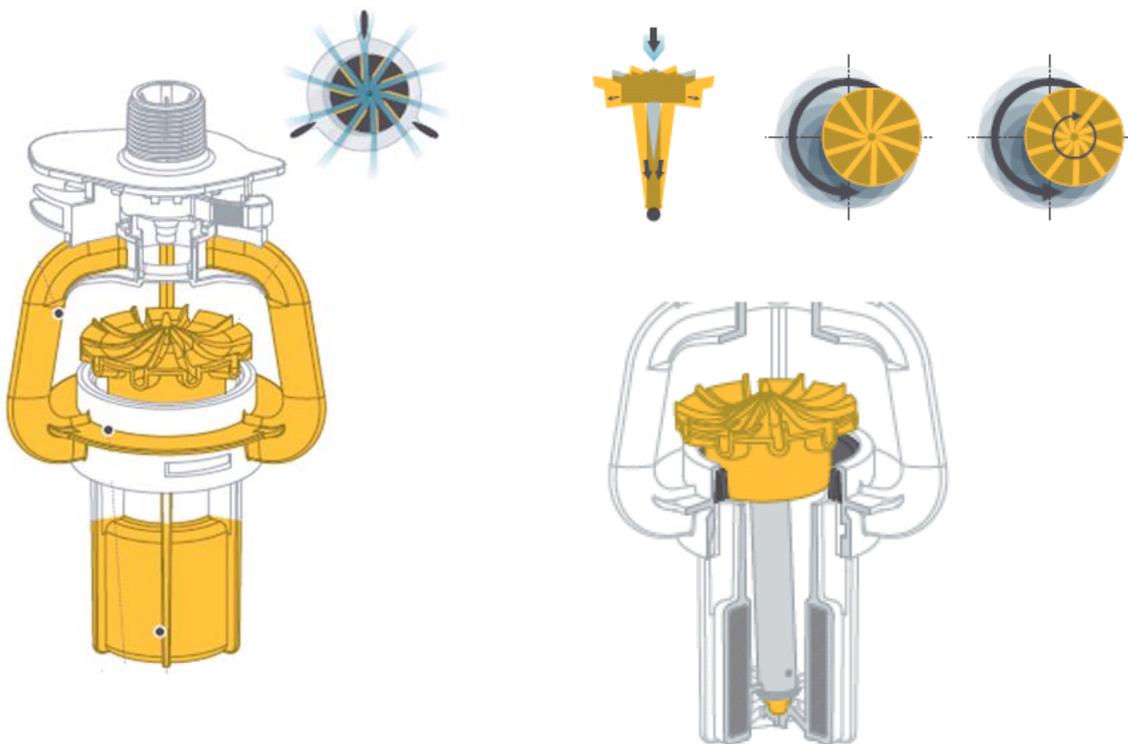


Рисунок 1.23 – «Komet 3-D Система движения»

Наиболее часто применяемыми в настоящее время как зарубежными, так и российскими компаниями – производителями дождевальных машин являются дождеватели фирмы Nelson Irrigation: Rotator (согласно рекомендациям производителей – большой радиус, равномерное орошение, низкие нормы полива для экономии воды и энергоресурсов); Accelerator (высокая равномерность); Spinner (для чувствительных культур и почв); Sprayhead (рассекатель, обеспечивающий

большую ветроустойчивость); Orbitor (повышенная ветроустойчивость, меньшая засоряемость).

Отражатели (дефлекторы) Komet разделяются на следующие типы в зависимости от условий применения (рис. 1.24).

Центральным критерием при разработке дождевателей компании Senninger является экономия природных ресурсов.

Одним из наиболее распространенных является дождеватель i-Wob Senninger с эффектом вращения и качания дефлектора с целью повышения равномерности (рис. 1.25).

За счет различных форм дефлектора обеспечивается значительное разнообразие свойств сходящего потока.

Компания Senninger разработала дождеватели с несколькими, установленными друг над другом дефлекторами (рис. 1.26).

Также в зависимости от культуры дождеватели обеспечиваются съемной вставкой для направления подачи воды под определенным углом (рис. 1.27).



Рисунок 1.24 –
Дефлекторы
Komet

Дождеватель Super Spray от Senninger (рис.1.27), оснащен взаимозаменяемыми дефлекторами (22 вида дефлекторов), удовлетворяющими различным требованиям по размеру капель, культурам, климатическим условиям и типам почвы [34].

Дефлекторы Super Spray различаются по форме (плоский, вогнутый, выпуклый) и по типу поверхности (гладкий, со средними желобками или с глубокими желобками).

Рисунок 1.25 – Дождеватель i-Wob с линейкой дефлекторов



Расход 0,1-1,15л/с

Расход 0,05-1,15л/с

Расход 0,05-1,15л/с

Расход 0,21,15л/с

Давление 0,06-0,1МПа



Стандартный угол с 6 желобками
Мелкие капли

Стандартный угол с 9 желобками
Средние капли

Низкий угол с 9 желобками
Средние капли

Низкий угол с 6 желобками
Крупные капли

Один дефлектор:



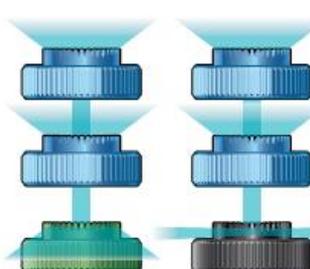
33 струи

Два дефлектора:



66 струй

Три дефлектора:



99 струй



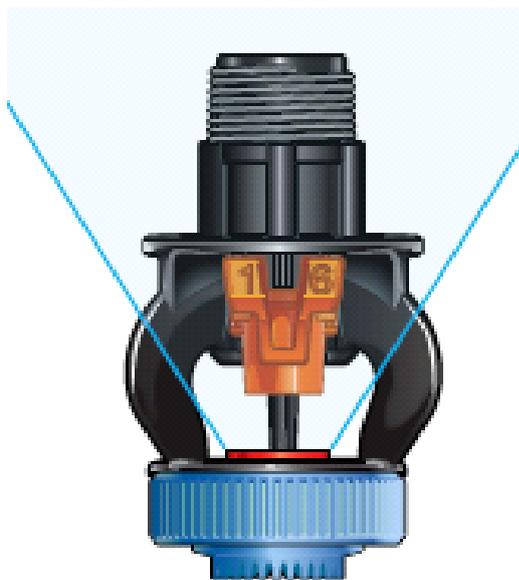
0,01-0,4л/с

0,25-0,7л/с

0,45-1,4л/с

Рисунок 1.26 – Многоярусные дефлекторы [280]

Кукуруза. Вставка для обработки: 58°



Хлопок. Вставка для обработки: 15-30°

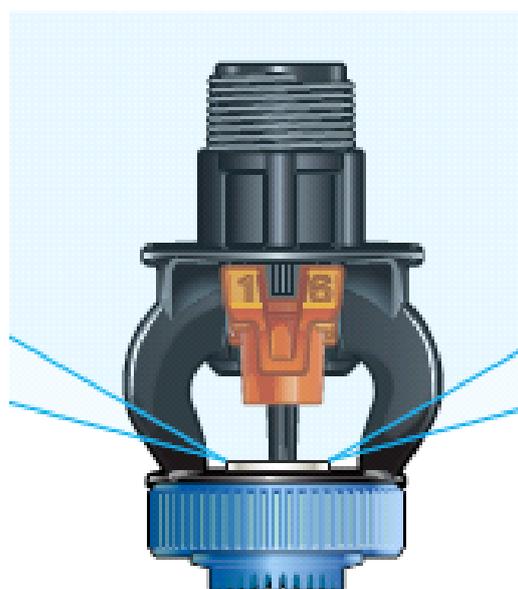


Рисунок 1.27 – Вставка для направления подачи воды

Форма и поверхность определяют схему полива и размер капель. Имеются дефлекторы для внесения агрохимикатов с поливной водой для высоких культур (кукуруза) и низких культур (хлопок), позволяющие достигать нижней стороны листы.

Анализ показывает, что большинство зарубежных компаний при совершенствовании дождевателей идет по пути узкой специализации, усложнении конструкции, выполняя их модульными, т.е. с возможностью взаимозаменяемости и унификации основных элементов дождевателя (рис. 1.29) [29].

Рассматривая номенклатурные ряды дождевателей, необходимо отметить наличие большого количества моделей и к ним различного типа дефлекторов, что не всегда является экономически целесообразным и оправданным.

Необходимо выделить наиболее значимые факторы, влияющие на процесс распыливания, и разработать ограниченный, но достаточный номенклатурный ряд дождевателей для различных эксплуатационных условий, применяемый для низконапорной российской и зарубежной техники.

Рассмотрим общие принципы разбрызгивания потока жидкости в зависимости от вида, формы и принципа работы дождевателя.

Струйные дождеватели представляют собой насадок с цилиндрическим или каким-либо другой формы соплом (рис. 1.30). Подаваемая из него струя распадается на капли, образуя полидисперсный факел с малым корневым углом. Распад жидкостных струй в значительной степени определяется формой струи, в свою очередь зависящей от формы сопла [29].

Рисунок 1.28 – Super Spray от Senninger



Плоский с желобками



Вогнутый с желобками



Выпуклый с желобками



Плоский гладкий



Вогнутый гладкий



Выпуклый гладкий

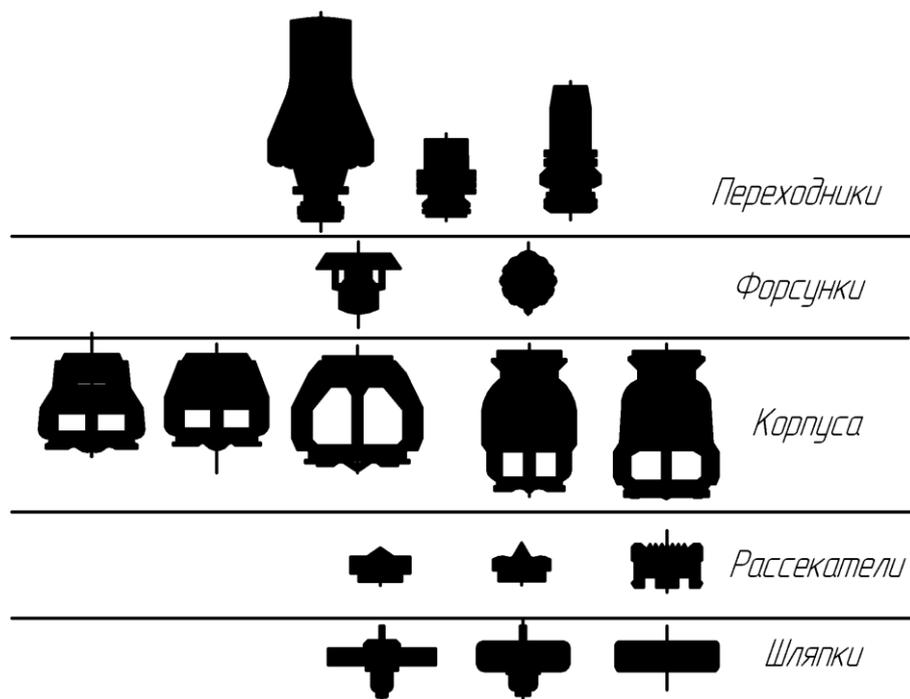


Рисунок 1.29 – Элементы дождевателей

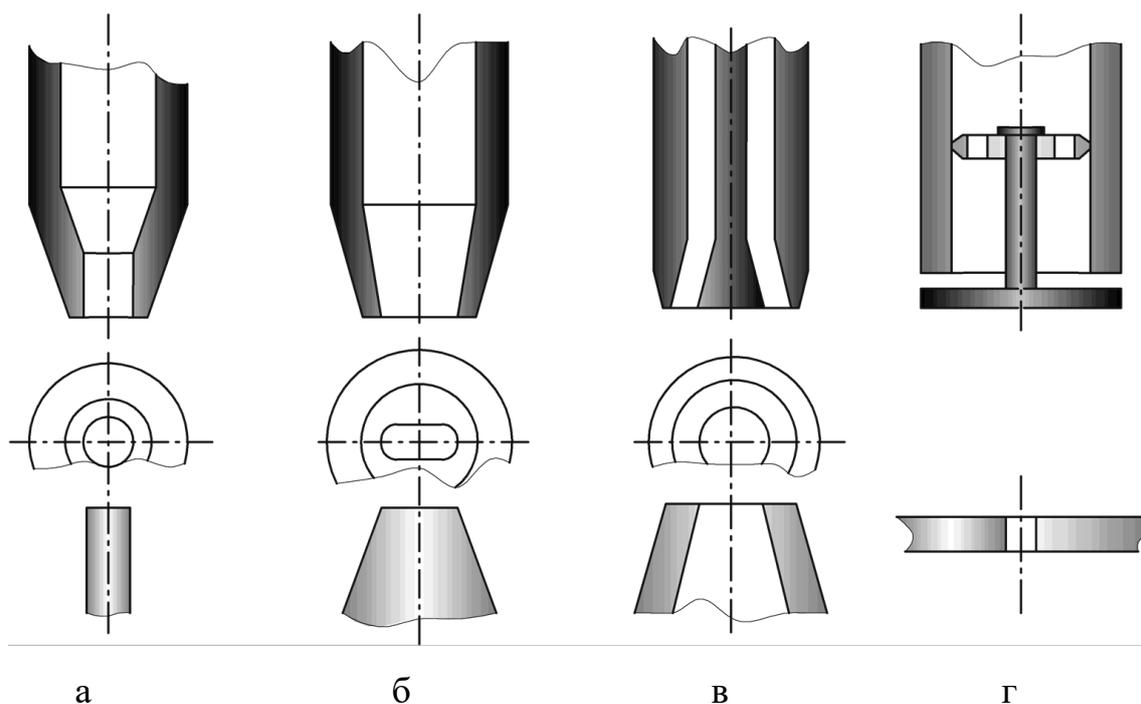


Рисунок 1.30 – Формы сопловых канавок и образующихся струй в струйных форсунках: а – цилиндрическое сопло (цилиндрическая струя), б – щелевидное сопло (плоская верная струя), в – кольцевое сопло (плоская коническая струя), г – сопло в виде круговой прорези (радиально расширяющаяся струя)

Работа дождевателей с соударением струй основана на взаимодействии между собой нескольких струй, вытекающих из соответствующих насадков (рис. 1.31). Из точки столкновения результирующий поток подается в радиальной плоскости, образуя плоскую пленку, распадающуюся на капли. При соударении цилиндрических струй образуется плоский верный факел, аналогичный факелу струйного дождевателя с щелевым соплом. При соударении плоских струй форма сечения факела близка к прямоугольной. Размеры факела и распределение жидкости в нем можно регулировать, изменяя параметры исходных плоских струй, их число и угол соударения [29].

В ударно-струйных дождевателях (дефлекторных) распыливание обеспечивается ударом струи о расположенный напротив сопла отражатель. Конфигурация отражателя задает факел в виде одиночного полого конуса или в виде нескольких конусов встроенных друг в друга [29].

Процесс распыливания, независимо от конструктивной схемы при этом, состоит из следующих фаз: течения жидкости в струе, течения в пленке по поверхности отражателя, срыва пленки с этой поверхности и распада на капли (распыла).

Центробежные насадки (рис. 1.33) имеют либо тангенциальные входные отверстия, либо направляющий шнек, задающие подаваемой жидкости вращательное движение. В сопловом канале жидкость движется вдоль его стенки в виде тонкой пленки, а центр заполняет образующийся воздушный вихрь. При истечении из сопла пленка сходится в виде полого конуса [29].

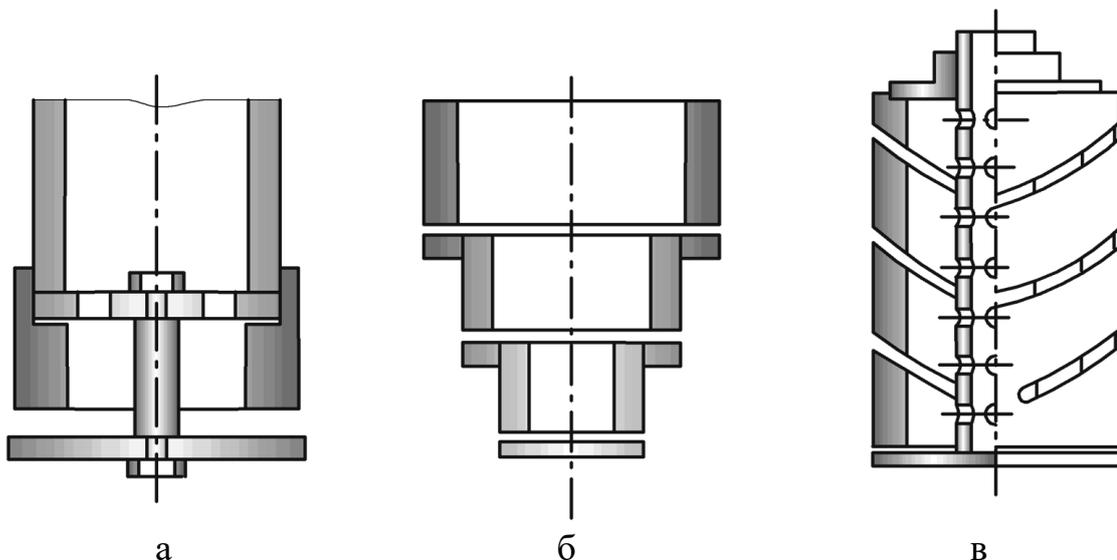


Рисунок 1.31 – Схемы струйных форсунок с соплом в виде круговой прорези: а – одноплечная, б – многоплечная; в – спиральная

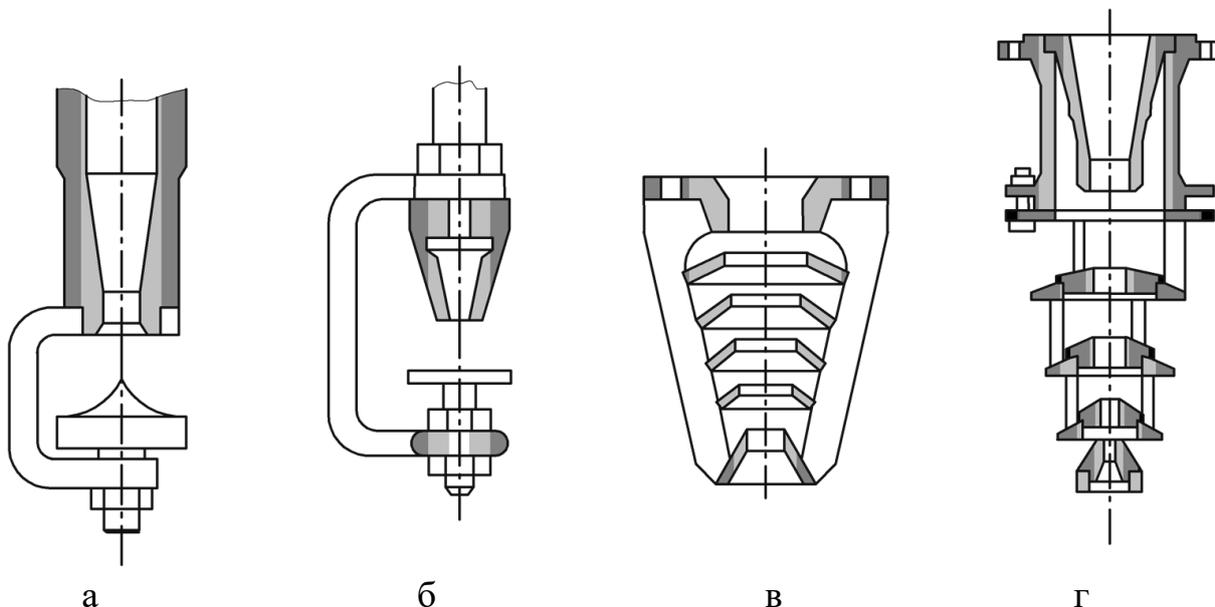


Рисунок 1.32– Схемы ударно-струйных форсунок со сплошным отражателем (а, б) и каскадных (в, г)

Конструктивные схемы раскателей потока жидкости

Раскатели потока жидкости в общем виде можно разделить на две основные категории: статические и вращающиеся.

Форма раскателя определяется требованием создания равномерной тонкой пленки и образования факела распыла. От формы рабочего элемента зависит режим течения, степень турбулизации, внутренние пульсации, а соответственно качество распыла [29].

Наибольшим многообразием конструктивных вариантов отличаются дисковые раскатели (рис.1.34). Самым простым является тарельчатый диск или конусный.

Дисковые элементы создают широкий факел. Помимо гладких, в настоящее время получили распространение дисковые элементы с искусственной шероховатостью. Размер шероховатости должен быть соизмерим или превышать толщину пленки жидкости на диске и в этом случае жидкость срывается не только с периферии диска, но и с кромок шероховатостей, что увеличивает дробление потока. При этом чем ближе к оси вращения элемент шероховатости, тем меньше скорость жидкостной пленки и тем больше угол отклонения распыливаемой жидкости. Для плавного входа жидкости на диск применяется центральный конический выступ [29].

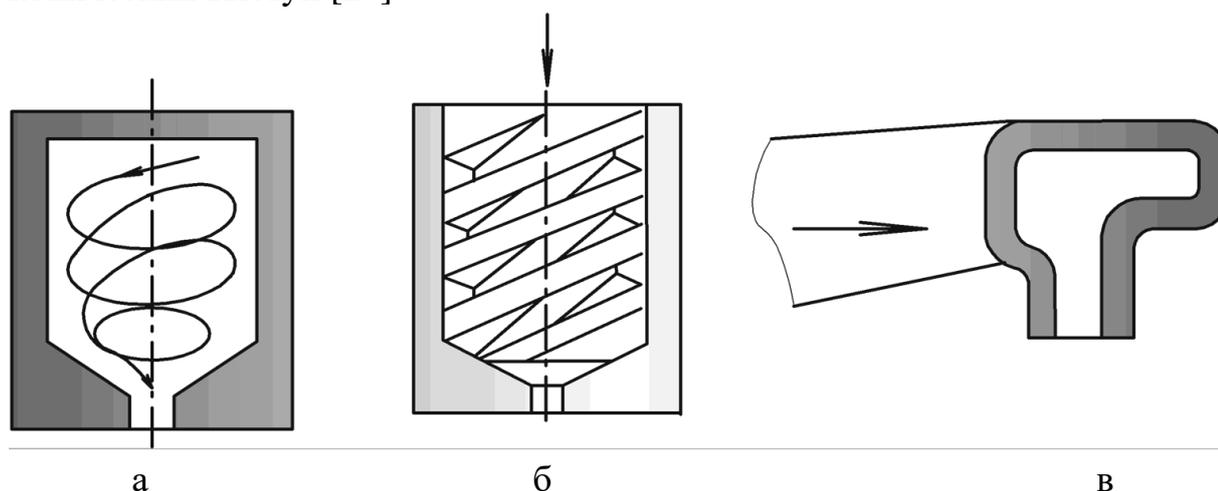


Рисунок 1.33 – Схемы центробежных форсунок: а – тангенциальная; б – шнековая; в – эвольвентная

Во вращающихся дефлекторах каналы изогнуты таким образом, что жидкость сходит с них по касательной к внешнему диаметру. Создается некоторый момент силы реакции вытекающей струи, и дефлектор начинает вращаться вокруг оси. Плотность орошения можно регулировать шириной, расположением и количеством канавок, а размер орошаемой поверхности – высотой канавок и углом раствора прорези.

Частота вращения определяется параметрами нагнетаемой жидкости. При давлении жидкости выше 0,02 МПа распылитель начинает вращаться, подавая жидкость в виде пленки. Дальнейшее повышение давления приводит к увеличению числа оборотов распылителя. При давлении выше 0,07 МПа уменьшается жидкостная пленка, и распад жидкости на капли происходит непосредственно у сопла.

Многоярусный дисковый рассекатель позволяет пропорционально увеличивать единичную производительность, однако важным требованием эффективности является равномерность распределения потока по ярусам.

В настоящее время дождеватели в виде дефлекторных насадок – одно из самых перспективных направлений. Они формируют мелкокапельный дождь с небольшой высотой подъема дождевого облака. Радиус захвата дождем достигает 6-18 метров, средняя интенсивностью 0,3-0,8 мм/мин [34].

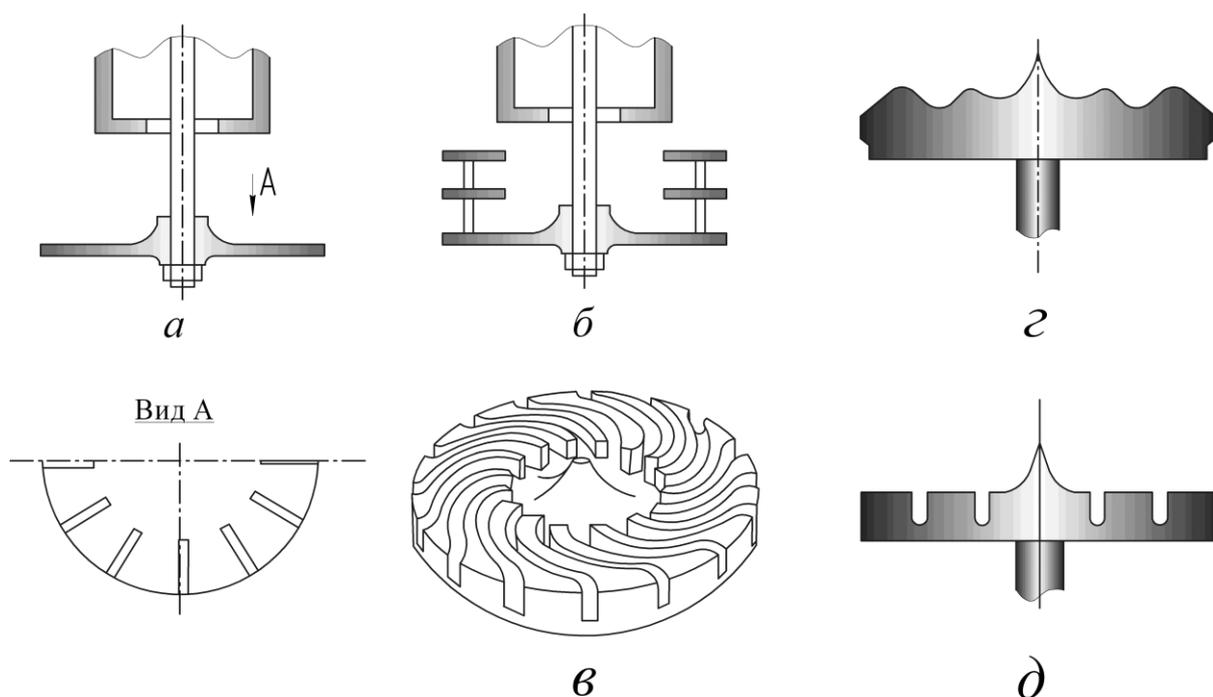


Рисунок 1.34– Схемы распыливающих элементов: *а* – гладкий одиночный диск; *б* – лопастной, многоярусный; *в* – с криволинейными канавками-проточками прямоугольного профиля; *г* – канавками обтекаемой формы; *д* – с канавками-проточками параболической формы

Изготовление дождевателей в виде дефлекторных насадок из полимерных материалов, снижает их стоимость по сравнению с металлическими.

Перечисленные выше преимущества позволяют сделать вывод о перспективности их применения на ДМ кругового действия, формирующих мелкокапельный, ветроустойчивый и эрозионно-безопасный дождь.

Т.о. можно выделить следующие основные требования к дождевателям:

- обеспечение качественных показателей полива при работе на низком напоре (диаметр капель, интенсивность, ветроустойчивость, эрозионная безопасность);
- низкая стоимость;
- универсальность и унификация отдельных элементов дождевателей для различных условий эксплуатации.

При этом необходимо выделить четкий и ограниченный ряд конструктивных исполнений дождевателей для основных условий эксплуатации ДМ и строго систематизировать их под условия применения.

Факторы, влияющие на выбор дождевателя:

- характеристики почвы,
- выращиваемые культуры,
- перепады высоты на поле (необходимость использования регуляторов давления),
- режим эксплуатации,

- наличие ветра и испарения,
- внесение агрохимикатов.

Устройства приповерхностного полива

Устройства приповерхностного полива отличаются также конструктивным разнообразием и материалами (рис.1.35). Западные компании Senninger, Nelson как правило изготавливают их из коррозионностойких, устойчивых к УФ-излучению термопластов. При этом различают модели: одинарные 180°, одинарные 125° и двойные 125°, применяемые со специальными защелкивающими на шпренгелях устройствами [34, 81].



Рисунок 1.35 – Устройства приповерхностного полива

Для поддержания постоянного заданного давления на выходе из дождевателя, вне зависимости от изменения давления на входе западные компании рекомендуют использовать регуляторы давления. К недостаткам их можно отнести значительную стоимость, засоряемость, узкий рабочий интервал модели и невозможность перенастройки (подавляющее большинство регуляторов не разборной конструкции), таблица 1.17 (рис. 1.36).

Таблица 1.17 – Технические характеристики линейки регуляторов давления «низкого и среднего расхода воды» Senninger

Модель	Заданное эксплуатационное давление, МПа	Максимальное давление на входе, МПа	Диапазон расхода воды, л/с	Модель	Заданное эксплуатационное давление, МПа	Максимальное давление на входе, МПа	Диапазон расхода воды, л/с
PRL06	0,041	0,551	0,03-0,31	PMR06 MF	0,041	0,551	0,25-1,01
PRL10	0,069	0,620	0,03-0,50	PMR10 MF	0,069	0,620	0,13-1,26
PRL12	0,083	0,620		PMR12 MF	0,083	0,620	
PRL15	0,103	0,655		PMR15 MF	0,103	0,655	
PRL20	0,138	0,689		PMR20 MF	0,138	0,689	
PRL25	0,172	0,724		PMR25 MF	0,172	0,724	
PRL30	0,207	0,758		PMR30 MF	0,207	0,758	
PRL35	0,241	0,793		PMR35 MF	0,241	0,793	
PRL40	0,276	0,827		PMR40 MF	0,276	0,827	

1.6 Критерии оценки дождевальных машин кругового действия

Технический уровень дождевальной машины – величина относительная. Она показывает, насколько изменилось значение того или иного параметра по сравнению с теми же параметрами ДМ, принятыми за эталон. При оценке технического уровня целесообразно вести сравнение с лучшими образцами аналогичных дождевальных машин.

Сравнение проводят по определенным показателям или признакам, которые выбирают в зависимости от функционального назначения изделия. Для дождевальных машин такими показателями могут быть потребляемая мощность привода, масса и габаритные размеры, соотношения длины, расхода и давления.

Т.о. необходимо оценить необходимость их установки в зависимости от условий эксплуатации.

Основные параметры дождевальных машин определяются на этапах разработки исходных требований, технических заданий и конструкторской документации и отражают в основном общепринятые в конкретный период времени воззрения на техническое и технологическое совершенство ДМ и характеризуют также уровень производства.



Рисунок 1.36 – Регуляторы давления

Дождевальную машину проще всего рассматривать как объект проектирования по требованиям, предъявляемым параметрами среды.

Процесс создания машины можно представить как взаимодействие между основными классификационными признаками определяющими машину в концепции ее создания. Как видно из рисунка 1.37, концептуальная цепь технических показателей машины (вес, форма, размер, мощность) подвержена воздействию со стороны требований среды и должна быть согласована с показателями уровня развития данных технических средств [29].

Причем категории «вес, форма, размер» определяют общее понятие «конструкция». Цепь продолжается связью «конструкции» с мощностью, определяющей удельные показатели технических характеристик, является определяющей для характеристик «расход и затраты» и замыкается оценкой фактора целесообразности – стоимостью [29].

Рассмотрим схему подробнее. Категорию «параметры среды» можно разделить на две основные категории: физика (например, физико-механические свойства почвы) и геометрия (геометрические параметры поля, рельеф местности, высота растений и др.)

Физико-механические свойства почвы (физика) ограничивают вес дождевальной машины, определяя ходовую систему. Размеры поливного участка, рельеф местности, высота растений – задают форму и размеры ДМ (ее длину, конструктивно-высотные свойства). Причем вес является лимитирующим фактором. Совершенство формы конструкции определяет полезную нагрузку в функции общего веса.

Заданные параметры ДМ через категории «вес», «форма» и «размер» определяют мощность, необходимую на привод машины. Данные три категории определяют конструкцию машины, которая характеризует надежность,

универсальность и технические возможности, которые в свою очередь влияют на стоимость машины.

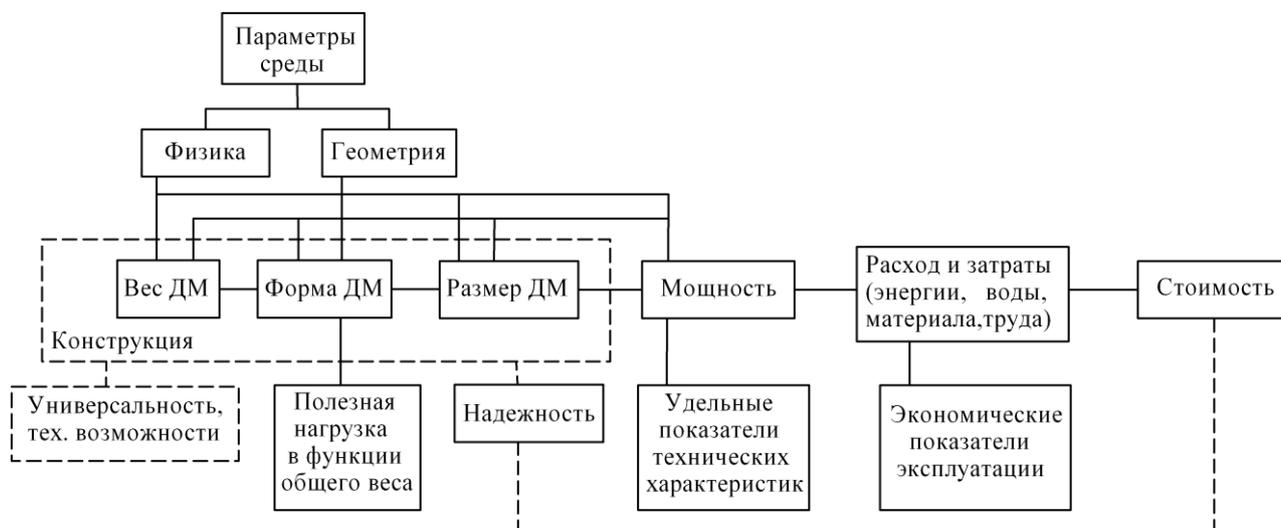


Рисунок 1.37 – Схема формирования концепции машины

Конструкция в целом является определяющим фактором мощности и группы «расход и затраты», поскольку она определяет расход энергии, воды, материалов на изготовление самой конструкции, затрат труда на обслуживание. «Конструкция» и «мощность» и определяют показатели уровня качества и возможности ресурсосбережения как при изготовлении самой машины, так и в процессе эксплуатации [29].

После обработки концептуальных представлений формируются конкретные требования к дождевальнй машине, ее параметрам и режимам функционирования. Цепь выработки требований к машине представляет собой последовательность взаимодействий, связанных с условиями среды, формирующими потребности в машине, и формирующими сами технические требования к машине.

Свойства ДМ и способы их оценки

Все потребительские, технико-экономические и эксплуатационные свойства машины создаются ее конструкцией, теми или иными узлами и агрегатами.

Из рисунка 1.39 видно, что при создании дождевальнх машин вопрос ресурсосбережения касается в основном снижения металлоемкости и стоимости. Оптимизация металлоконструкции (основная опора, ферма, водопроводящий трубопровод, опорные тележки) следует рассматривать с позиции экономии материальных и финансовых затрат. Лимитирующими факторами являются в основном прочность и жесткость конструкции.

Причем, при рассмотрении основной опоры и опорных тележек лимитирующим фактором помимо этого являются конструктивно-высотные свойства машины.

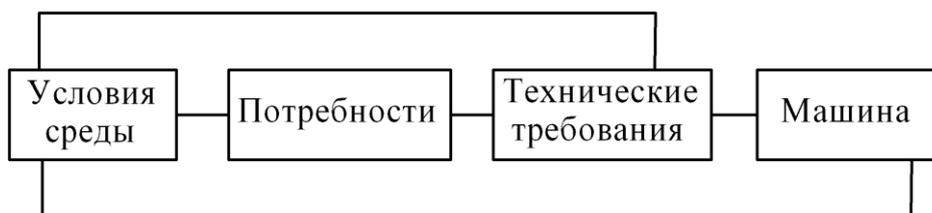


Рисунок 1.38– Схема формирования требований к параметрам машины

При оценки водопроводящего пояса машины лимитирующим факторами снижения показателей «вес, форма размер» являются обеспечение параметров потока жидкости и общая длина машины, что требует более подробного рассмотрения методики гидравлического расчета водопроводящего пояса широкозахватных дождевальных машин.

Категория «шины» при снижении себестоимости ограничивается показателями «максимальная нагрузка на колесо и пятно контакта», влияющее на удельное давление, колею, а соответственно другие сопутствующие свойства.

При рассмотрении дождевателей необходимо ориентироваться на достижение максимальных характеристик и качества полива при минимальных затратах и оценить возможность выполнения их из полимерных материалов.

Категория «привод» лимитируется фактором требуемой мощности и надежность и сводится к рациональному выбору агрегатов.

При рассмотрении категории «система автоматики и управления» необходимо ориентироваться на обеспечение надежности выполнения технологического процесса. Расширение же технологических возможностей следует рассматривать как дополнительные опции по требованию.

Критерии оценки ДМ кругового действия

Проектируемые в настоящее время дождевальные машины не могут считаться универсальными, пригодными для всего разнообразия почвенно-климатических условий, культур, рельефов. Конструктивно-технологические особенности ДМ должны выбираться из предполагаемых условий эксплуатации, организационно-хозяйственных условий, структуры севооборотов, естественной увлажненности территории, экологического состояния земель, обеспеченности энергетическими и трудовыми ресурсами, на основе наиболее значимых, первоочередных требований.

Однако следует выделить комплекс показателей технического уровня качества дождевальных машин и критерии оптимизации, по которым имеется возможность ранжирования техники, согласно которым применимость сравниваемых видов ДМ будет научно обоснована (рис. 1.40).

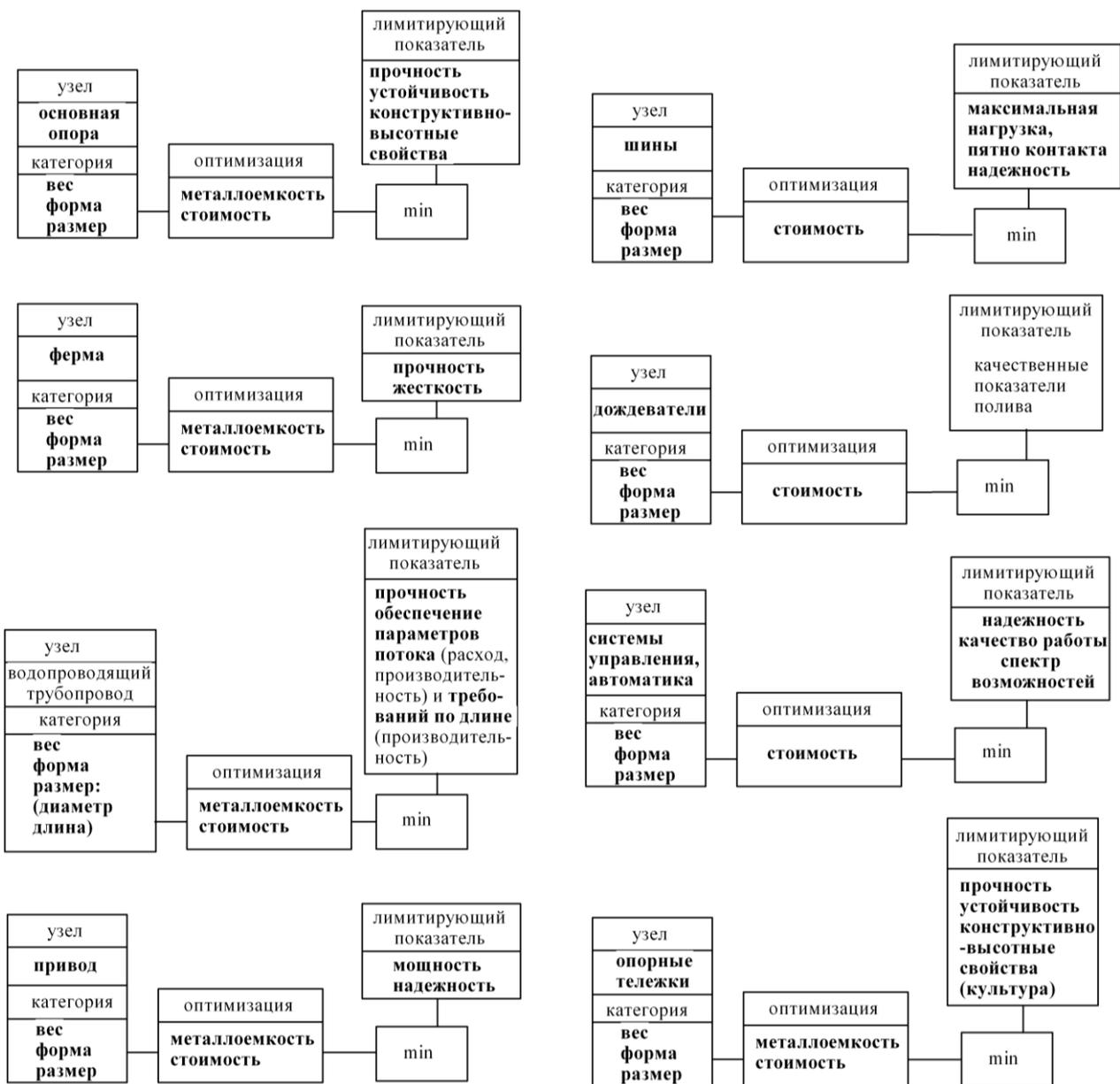


Рисунок 1.39 – Оптимизация параметров по узлам машины

Критерии оценки уровня ДМ можно условно разделить на четыре блока с однородными показателями:

- 1 – показатели, характеризующие энергетическую эффективность и энергосбережение;
- 2 – показатели агроэкологии и рационального использования земельных и водных ресурсов;
- 3 – экономические показатели и рациональное использование финансовых ресурсов;
- 4 – показатели, характеризующие конструктивное совершенство и экономию материальных и трудовых ресурсов.

Рассматривая все показатели, можно разделить их также на группы, которые стремятся к минимуму, имеющие широкие граничные условия и к максимуму, табл. 1.18.

Для оценки гидравлической эффективности ДМ принимаем следующие показатели, таблица 1.19.

За показатель гидравлической эффективности примем гидравлический (пьезометрический) уклон, характеризующий потерю напора на единицу длины [29].

Гидромодуль дождевальнoй машины, m_{Γ} – отношение расхода, л/с к площади полива, га.

За показатель гидравлической эффективности примем гидравлический (пьезометрический) уклон, характеризующий потерю напора на единицу длины.

Гидромодуль дождевальнoй машины, m_{Γ} – отношение расхода, л/с к площади полива, га.

Важнейшим фактором повышения конкурентоспособности современных широкозахватных дождевальных машин является широкое применение ресурсосберегающих технологий, т. е. рациональное использование водных, земельных, материальных, энергетических, трудовых и финансовых ресурсов.

Ресурсосбережение при создании ДМ, обеспечение эффективной и производительной работы в различных условиях эксплуатации, при различных требованиях к режимам работы, на полях, имеющих значительную изменчивость физико-механических свойств почвы, представляет собой сложную техническую задачу оптимизации всех параметров, определения их взаимозависимостей, зависимостей от внешних факторов и требует решения комплекса научных и практических задач.

Конструктивно-технологические особенности широкозахватных дождевальных машин должны выбираться из предполагаемых условий эксплуатации, организационно-хозяйственных условий, структуры севооборотов, естественной увлажненности территории, экологического состояния земель, обеспеченности энергетическими и трудовыми ресурсами, для чего были определены наиболее значимые требования и критерии качества.

Эффективное использование водных ресурсов и качество дождевания обеспечивается за счет мелкокапельной структуры дождя, его равномерного распределения по орошаемой площади, исключения лужеобразования от стока воды по поверхности орошения, а также минимальных потерь на испарение и снос ветром, что требует дальнейшего совершенствования дождеобразующих устройств и схем их расстановки. При этом необходимо выделить четкий и ограниченный ряд конструктивных исполнений дождевателей для основных условий эксплуатации ДМ и строго систематизировать их под условия применения.

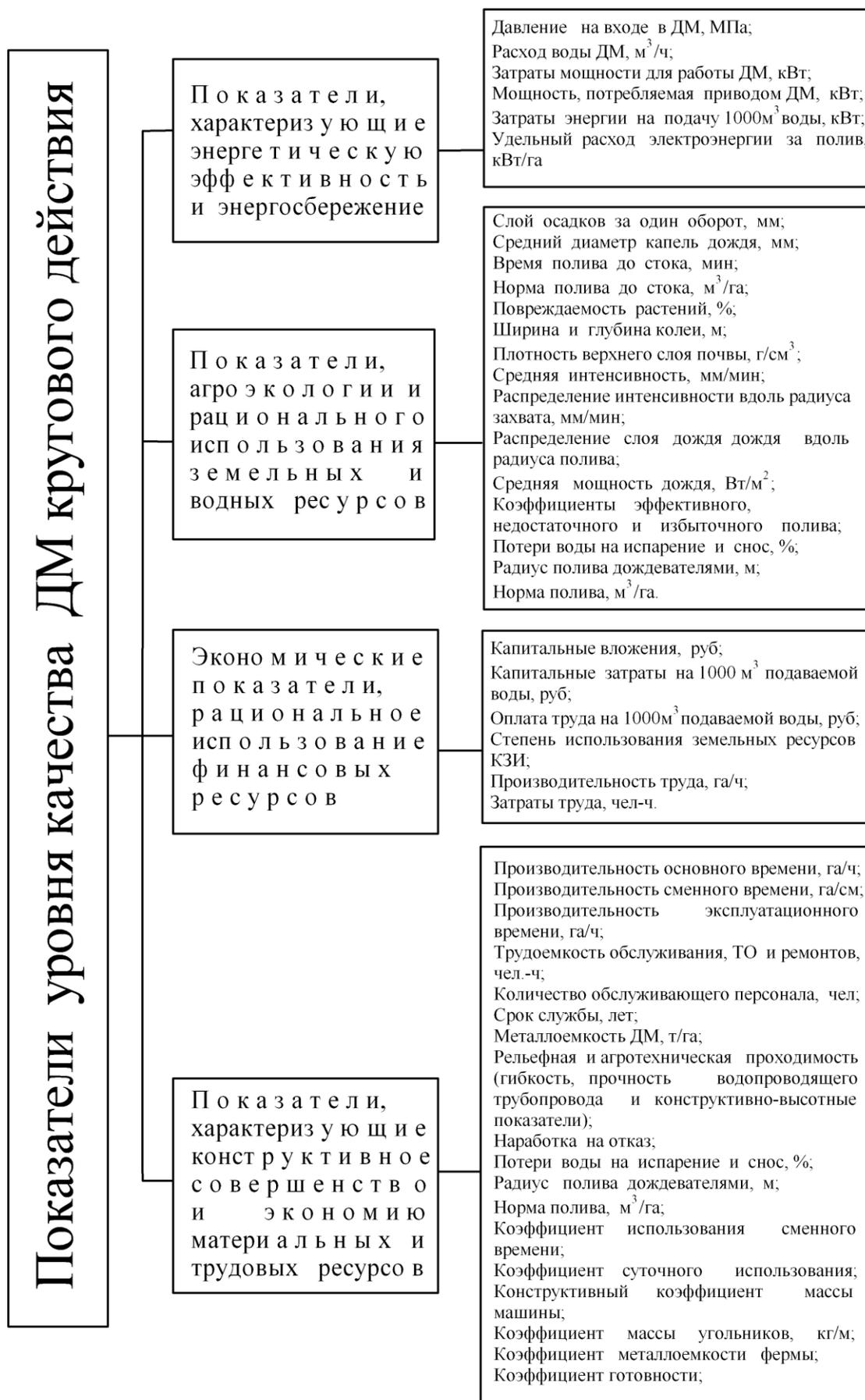


Рисунок 1.40 – Показатели уровня качества ДМ

Таблица 1.18 – Показатели дождевальных машин

Наименование показателя	Размерность	Критериальное значение
1	2	3
Энергоемкость орошения в расчете на 1000 м ³ поданной воды, $N_{ор}$	кВт · ч/1000м ³	→ min
Удельный расход энергии на полив, Э	кВт/га	→ min
Затраты мощности для работы дождевальной машины, N_{SP}	кВт	→ min
Расход ДМ, Q_0	м ³ /ч	→ min
Металлоемкость ДМ, М,	т/га	→ min
Конструктивный коэффициент массы машины, $K_{ККМ}$		→ min
Коэффициент массы угольников, $K_{УГ}$		→ min
Коэффициент металлоемкости фермы, $K_{ФП}$		→ min
Трудоемкость обслуживания, ТО и ремонтов	чел.-ч	→ min
Затраты труда, Z_T	чел.-ч	→ min
Оплата труда на 1000 м ³ подаваемой воды,	руб	→ min
Капитальные вложения на 1000 м ³ воды $\Pi_{1000КАП}$	руб/1000 м ³	→ min
Капитальные вложения $\Pi_{КАП}$	руб	→ min
Коэффициенты: недостаточного $K_{НП}$ и избыточного полива $K_{ИЗП}$		→ min
Средняя мощность дождя, $N_{УД}$	Вт/м ²	→ min
Средняя интенсивности дождя, $\rho_{ср}$	мм/мин	→ min
Плотность верхнего слоя почвы,	г/см ³	→ min
Ширина и глубина колеи, Н", В _к	м	→ min
Повреждаемость растений,	%	→ min
Давление на входе в ДМ, Р _в	МПа	→ min
Количество обслуживающего персонала,	чел	→ min
Потери воды на испарение и снос,	%	→ min
Норма полива до стока, $m_{дост}$,	м ³ /га	→ max
Время полива до стока t,	мин	→ max
Степень использования земельных ресурсов КЗИ		→max (КЗИ ≥0,97)
Наработка на отказ	ч	→ max
Производительность труда Π_T	га/ч	→ max
Производительность: – основного времени, – сменного времени.	га/ч га/см	→ max

Срок службы	лет	→ max
Коэффициент готовности ДМ к работе, $K_{Г}$		→ max ($K_{Г} \geq 0,96$)
Коэффициент использования сменного времени ДМ $K_{СМ}$		→ max ($K_{СМ} > 0,95$)
Коэффициент использования суточного времени ДМ $K_{СУТ}$		→ max ($K_{СУТ} > 0,90$)
Коэффициент эффективного полива $K_{ЭП}$		→ max ($K_{ЭП} > 0,85$)
Слой осадков, $h_{ос}$	мм	
Средний диаметр капель $d_{СР}$	мм	$d_{СР} \leq 1,5$

Таблица 1.19 – Показатели гидравлической эффективности ДМ

Наименование показателя	Размерность	Критериальное значение
Давление на входе в машину: для ДМ типа «Кубань», для ДМ типа «Фрегат»	МПа МПа	0,3-0,45 0,6-0,7
Гидравлический уклон		→ min
Гидромодуль $m_{Г}$	л/с/га	→ 1,0

Оценка и выбор таких показателей как длина пролета, конструктивно-высотные свойства, конструкция фермы и диаметры водопроводящего трубопровода, выбор ходовых систем необходимы на стадии их проектирования или последующего выбора модификации или компоновки машины, для чего должны быть разработаны четкие рекомендации и критерии оценки.

В настоящее время в мелиоративной отрасли ощущается значительная нехватка современной и высокоэффективной отечественной дождевальной техники. Необходимо усовершенствование уже существующих ДМ в низконапорные экономичные модификации, а также разработка новых высокоэффективных дождевальных машин, отвечающих современным требованиям.

В конечном счете, это позволит обеспечить ресурсосбережение при проектировании и работе дождевальных машин, усовершенствовать существующие и разработать и создать новые, обеспечивающие в различных условиях экологически-безопасные и эффективные технологии полива.

2 ПОЛИВ ДОЖДЕВАНИЕМ

2.1 Допустимая интенсивность при дождевании. Впитывание воды в почву. Ирригационная эрозия почвы

Согласно нормативным документам [48], полив дождеванием рекомендуется применять: на незасоленных и промытых почвах со средней интенсивностью искусственного дождя не превышающей впитывающей способности почв в конце полива; при уровне грунтовых вод не менее 2,5 м; при поливных нормах не более 600 м³/га; при ветре со скоростью, превышающей допустимую для дождевальными машин не более 20 процентов.

Первое ограничение связано с ирригационной эрозией при дождевании, возникающей при подаче воды с интенсивностью, превышающей скорость впитывания воды в почву.

Инфильтрационная способность почв определяется ее свойствами, состоянием орошаемой поверхности, качественными и количественными характеристиками дождя, временем полива. А.Н. Костяков допустимую интенсивность при дождевании определял, исходя из механического состава почвогрунтов: для тяжелых 0,1-0,2 мм/мин; средних 0,2-0,3 мм/мин; легких 0,3-0,8 мм/мин.

М.И. Багров и И.Г. Кружилин учитывали в своих рекомендациях уклоны орошаемой поверхности. На склонах с уклоном 0,01-0,12 допустимая интенсивность изменяется от 0,5 до 0,85 мм/мин для легких почв; 0,4-0,2 мм/мин для средних; 0,2-0,1 мм/мин для тяжелых [45].

В общем виде, допустимая интенсивность в зависимости от типа почвы, уклона местности и диаметра капель должна соответствовать следующим значениям (табл. 2.1. и 2.2) [49].

Приведенные данные являются ориентировочными, осредненными. Применительно к конкретным почвенно-рельефным условиям они должны корректироваться с учетом уклона поверхности орошаемого поля, фазы развития орошаемой культуры и состояния агрофона и др.

Таблица 2.1 – Допустимая интенсивность дождя, мм/мин

Почвы	Уклон			
	0...0,05	0,05...0,08	0,08...0,12	>0,12
Песчаные	0,85/0,85	0,85/0,64	0,64/0,44	0,42/0,21
Песчаные, подстилаемые более плотной подпочвой	0,74/0,64	0,53/0,42	0,42/0,32	0,32/0,17
Легкие супесчаные	0,74/0,42	0,53/0,34	0,42/0,25	0,32/0,17
Легкие супесчаные, подстилаемые более плотной подпочвой	0,53/0,32	0,42/0,21	0,32/0,17	0,21/0,13
Среднесуглинистые	0,42/0,21	0,34/0,17	0,25/0,13	0,17/0,09
Среднесуглинистые, подстилаемые более плотной подпочвой	0,25/0,13	0,21/0,11	0,17/0,07	0,13/0,04
Тяжелые суглинки и глины	0,09/0,07	0,07/0,04	0,05/0,034	0,04/0,025

Примечание: значения в числителе – для участков, занятых сельскохозяйственными культурами; в знаменателе – без культуры.

Таблица 2.2 – Эрозионно-допустимая поливная норма, м³/га различных по водопроницаемости почв и энергетических параметров дождя

Средний диаметр капель, мм	Интенсивность дождя, мм/мин									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Почвы слабой водопроницаемости, $K_v = 30$ мм										
1,0	585	415	335	295	265	235	225	205	195	185
1,5	455	325	265	225	205	185	175	165	155	145
2,0	355	255	205	175	165	145	135	125	125	115
2,5	275	195	165	145	125	115	105	105	95	95
3,0	205	155	125	105	95	85	75	75	65	65
Почвы средней водопроницаемости, $K_v = 60$ мм										
1,0	1455	815	665	585	515	475	435	415	385	365
1,5	905	635	525	455	405	375	345	325	305	295
2,0	7005	495	405	355	315	285	265	255	235	225
2,5	555	395	315	285	255	225	215	195	185	155
3,0	445	315	255	215	195	175	165	155	145	135
Почвы сильной водопроницаемости, $K_v = 90$ мм										
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1,0	1725	1225	1005	865	775	705	655	615	585	555
1,5	1355	955	785	675	605	555	515	475	455	435
2,0	1045	745	645	525	475	435	405	375	355	335
2,5	815	585	475	415	375	335	305	295	285	265
3,0	655	455	365	325	325	275	245	225	215	205

Примечание: K_v – коэффициент водопроницаемости почвы в первую единицу времени 1 час, мм/ч.

Максимальных значений досточковая поливная норма достигает при поливе мелкодисперсным дождем. Однако следует учитывать увеличение процента испарения и сноса ветром.

При поливе дождеванием различают: безнапорное впитывание; комбинированное и напорное впитывание. Напорное впитывание возникает при существенном нарушении баланса между подаваемой и впитывающейся водой. Происходит образование организованного поверхностного стока, вызывающего отрыв и перенос вместе с водой почвенных частиц.

Скорость и эрозионное воздействие стоковых потоков, определяются общими, локальными уклонами, а также микро перепадами на поверхности поля. Известно [73], что при микро перепадах почвы высотой 10 см скорость потока увеличивается до 1,5 м/с, разрушая даже плотные грунты.

Эрозионные процессы также инициируются и наличием на поле колеи, образованной колесами опорных тележек, причем потери орошаемой площади и урожая при их образовании могут достигать 6% [45].

В более широком смысле под эрозией понимается не только смыв почвы поверхностными потоками воды, но и разрушение почвенных агрегатов каплями дождя, так называемая капельная эрозия. Известно, что при поливе ДМ «Фрегат» под воздействием капель разрушается структура и образуется почвенная корка толщиной 4-6 мм, снижающая водопроницаемость на 25% [45].

Процесс каплеобразования при дождевании подробно изучался А.И. Исеевым [31]. Размеры капель колеблются в пределах от 0,4 до 4,0 мм [59-60]. В ряде исследований [45, 73] отмечено негативное влияние на верхний слой почвы увеличения диаметра капель.

Распределение искусственного дождя по поверхности орошения имеет достаточно сложный характер. Влияет неравномерность по ширине захвата машины, по радиусу от сопла дождевателей. Зависит от перекрытия струй соседних дождевателей, колебания расхода и напора, метеофакторов и т.п.

С целью упрощения исследований, для установления нормы полива чаще всего учитывают только основные факторы: динамическое воздействие капель дождя на почву, интенсивность дождя, технологические особенности работы машин, режим движения. Такой упрощенный подход позволяет выявить наиболее опасные в отношении эрозии участки. Например, для ДМ «Кубань-ЛК1» интенсивность дождя в начале трубопровода составляет 0,4 мм/мин, а ближе к концу 1,25 мм/мин, где и будут самые низкие досточковые поливные нормы.

В работах ВолжНИИГиМ [59-60] приводятся данные, что с пятой до двенадцатую тележку ДМ «Фрегат» интенсивность увеличивается от 0,29 до 0,72 мм/мин, а по радиусу дождевального аппарата – до 1,7 мм/мин. На базовой модификации дождевальной машины «Фрегат» получена средняя интенсивность дождя 0,23-0,47 мм/мин, в то время как минимум и максимум на отдельных участках от 0,18 мм/мин до 0,60 мм/мин. Средние диаметры капель концевых участков струй 8-16 тележек находились в пределах 1,5-5,1 мм. У «Кубани-ЛК» средняя интенсивность дождя – 0,98 мм/ми, диаметр капель – 1-1,2 мм (при оснащении короткоструйными дождевальными насадками) [73].

Согласно рекомендациям, чтобы расширить область применяемых поливных норм на один оборот допускается и некоторая величина стока в объемах от 10 до 25% от объема подаваемой воды или до 25% от досточковой нормы [73].

Изучению вопроса впитывания воды в почву посвящены работы многих ученых. Общая закономерность просачивания воды в почву, установленная А.Н. Костяковым, мм/мин [45]:

$$K_t = \frac{K_0}{t^q}, \quad (2.1)$$

где

K_t – коэффициент впитывания в момент времени t ;

K_0 – начальный коэффициент впитывания;

q – эмпирический коэффициент.

Ф. Г. Абрамов охарактеризовал впитывающую способность почвы при коротко- и среднеструйном дождевании аналогично А.Н. Костякову. Продолжительность полива без образования луж [45]:

$$T = \frac{K_{ВП}}{\rho_{СР} П}, \quad (2.2)$$

где

$\rho_{СР}$ – средняя интенсивность дождя, мм/мин;

$K_{ВП}$ – коэффициент, характеризующий водопроницаемость почв;

$П$ – показатель степени (от 0,94 до 5,45).

Н.С. Ерхов аналогично определил продолжительность свободной фильтрации по формуле [45]

$$t = \frac{A}{\rho_{СР}^B} = \frac{A}{\rho_{СР}^{1,5}}, \quad A = P e^{-cd_K}, \quad t = \frac{P}{\rho_{СР}^{1,5} e^{0,65d_K}}, \quad (2.3)$$

A – параметр, зависящий от типа почв, агрофона, диаметра капель;

B – показатель степени, принят равным 1,5;

c – параметр, средневзвешенное значение которого 0,65;

P – показатель безнапорной водопроницаемости почв при дождевании, т.е. слой осадков в мм, впитывающийся в почву в фазе свободной инфильтрации при поливе дождем интенсивностью 1 мм/мин.

$$P = h \sqrt{\rho_{СР}} e^{0,5d_K}, \quad t = \frac{c}{\rho_{СР}^w}, \quad h = \frac{c}{\rho_{СР}^{w-1}}, \quad (2.4)$$

где

h – слой дождя, мм,

$\rho_{СР}$ – интенсивность дождя, мм/мин,

d_K – диаметр капель, мм,

c и w – опытные параметры;

t – время, мин.

Параметры безнапорного впитывания представлены в таблице 2.3. Кривые безнапорного впитывания для различных типов почв представлены на рисунке 2.1.

Сравнения эрозионно-допустимых поливных норм по формуле Н.С. Ерхова и гиперболе показывает хорошее совпадение, табл. 2.4.

На основании анализа и принятой классификации можно заключить, что светло-каштановые, засоленные почвы, относятся к почвогрунтам с низкой впитывающей способностью, темно-каштановые – к почвам со средней водопроницаемостью, а черноземы при предполивной влажности имеют высокую водопроницаемость в верхнем десятисантиметровом слое [73].

Таблица 2.3 – Параметры безнапорного впитывания

Тип почвы	Наименьшая влагоемкость, %	Исходная влажность, % НВ	Параметры гиперболы		Р
			c	w	
Светло-каштановые (засоленные)	19,6	70	8,35	1,33	14,0
Темно-каштановые	24,2	75	33,5	1,33	48,4
Черноземы	29,7	60	51,5	1,43	78,1
Черноземы	29,7	95	30,4	0,60	41,6
Черноземы	29,7	95	32,8	1,08	59,0

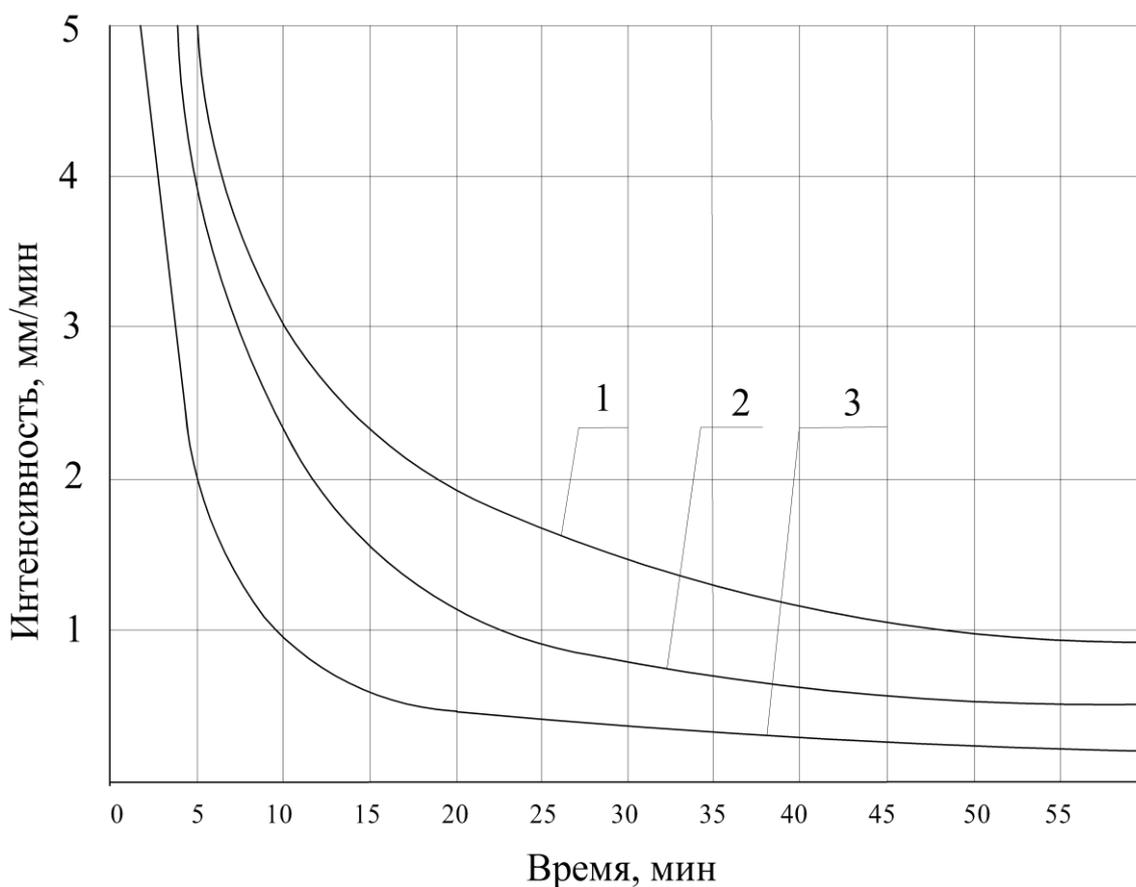


Рисунок 2.1 – Кривые безнапорного впитывания: 1 – черноземные почвы, 2 – темно-каштановые почвы, 3 – светло-каштановые почвы

Соответственно одним из требований для дождевальных машин для работы в Поволжье: формирование дождя с характеристиками: диаметр капель 0,5-1,0 мм, интенсивность до 0,5 мм/мин; равномерности распределения по площади не менее 0,7.

Таблица 2.4– Эрозионно-безопасные поливные нормы для ДМ «Кубань»

Тип почвы	Исходная влажность, %НВ	Эрозионно-допустимые поливные нормы, м ³ / га	
		по гиперболе	по Н.С. Ерхову
Светло-каштановые (засоленные)	70	80	80
Темно-каштановые	75	315	270
Черноземы	60	480	440
Черноземы	95	330	230
Черноземы	95 в слое 0-10 см, глубже 75%НВ	330	330

2.2 Схемы движения. Технологические приемы. Режим полива

Эксплуатация дождевальных машин кругового действия, в частности «Фрегат-ДМУ» и «Кубань-ЛК», зависит от способа их использования: групповая схема – при работе от стационарной насосной станции, индивидуальная схема – с питанием водой от передвижной дизель- или электрифицированной насосной станции.

Известны две основные схемы работы машины «Фрегат-ДМУ» и «Кубань-ЛК» (рис.2.2) [15].

Схема 1 (рис. 2.2 а). Работа на одной позиции. Неорошаемые углы составляют 16...18% при работе концевой аппаратуры, коэффициент земельного использования КЗИ= 0,82-0,84.

Схема 2 (рис. 2.2 б). Работа на двух смежных позициях в пределах одного поля или на двух смежных полях, КЗИ=0, 82 . . .0, 84.

ДМ «Фермер Фрегат-ДМУ», «Мини-Фрегат-К», «Мини-Кубань-ЛК», «Фермер-Кубань-ЛК-1» могут работать на двух-трех позициях с использованием для перемещения трактор тягового класса 15кН (рис. 2.2 в).

Поскольку существующие конструкции широкозахватных дождевальных машин не позволяют изменять характеристики дождя в зависимости от впитывающей способности почвы без изменения конструкции всего дождевого пояса, в процессе работы возникает необходимость регулировать величину поливных норм только скоростью движения тележек и направлением движения. А также использовать различные технологические приемы, в частности применять дробное внесение больших поливных норм. Очевидно, что гидравлический привод движения дождевальных машин «Фрегат» значительно усложняет ситуацию, приводя к большому количеству конструктивных доработок [59-60, 74].

Для обеспечения бесстокового полива требуемая поливная норма может быть выдана за несколько проходов (оборотов) машины [45]. Это позволяет экономить оросительную воду, делает орошение экологически безопасным и

поддерживает оптимальную влажность почвы. Согласно существующим режимам орошения гидромодуль ДМ должен быть близок к единице [74].

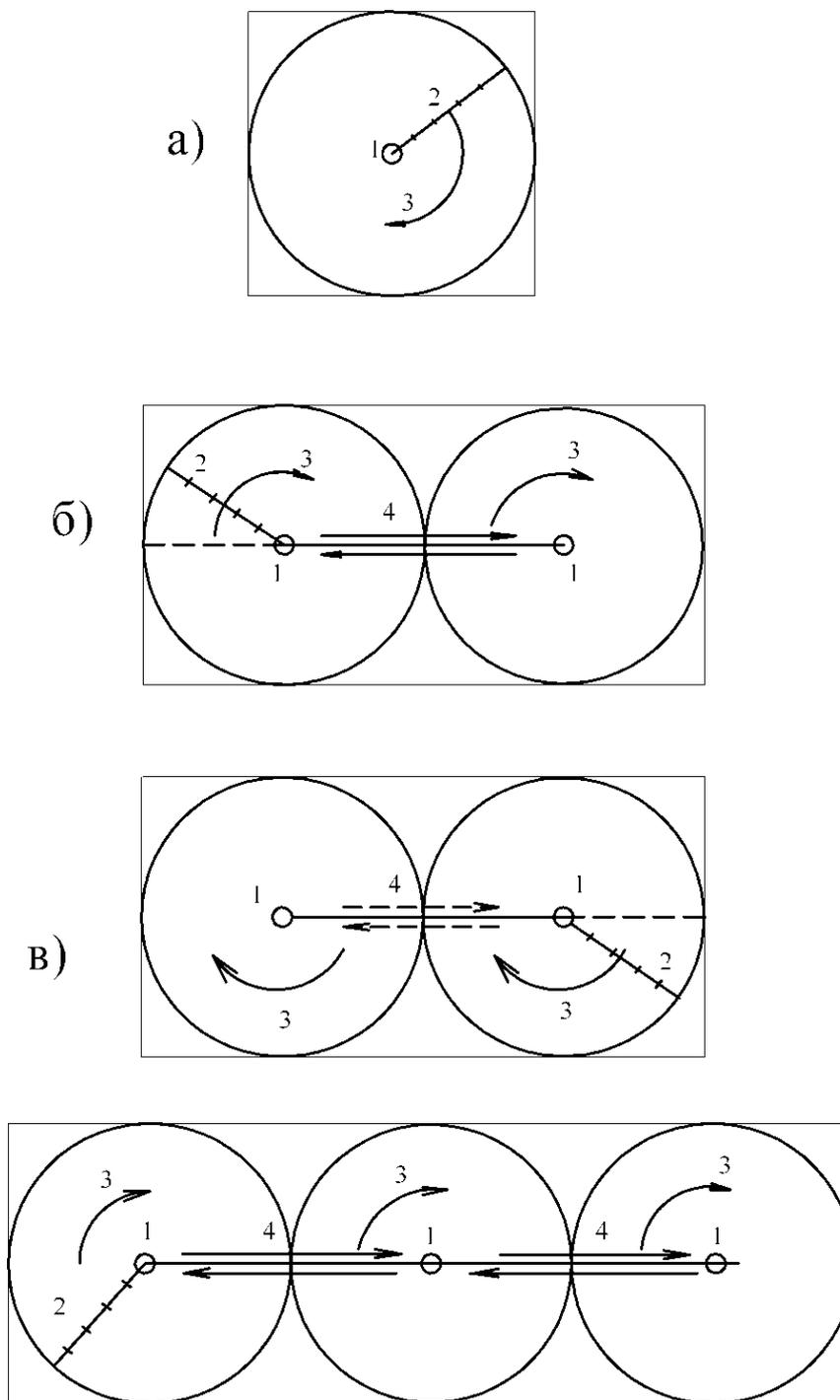


Рисунок 2.2 –Схемы работы многоопорных машин кругового действия: а) и б) – «Фрегат-ДМУ», «Кубань-ЛК» на одной и двух позициях; в) – «Фермер-Фрегат-ДМУ», «Мини Фрегат-К», «Мини Кубань-ЛК», «Фермер Кубань-ЛК-1» на двух и трех позициях: 1 – гидрант, 2 – дождевальная машина; 3 – направление движения машины; 4 – направление перемещения машин с позиции на позицию

При поливе почв, имеющих низкий коэффициент фильтрации, с использованием дождевальных машин кругового действия на поверхности образуется слой влажного грунта, способствующий буксованию колес машины. Что в свою очередь ведет к уменьшению скорости и увеличению нормы полива, сверх задаваемой. Чтобы избежать этого, необходимо увеличить скорость движения, используя специально подготовленную колею [56-58]. Однако считают, при этом уменьшается количество накопленной в почве воды и одновременно увеличивается испарение.

В качестве мероприятия по борьбе со стоком, А.Н. Костяков дает рекомендации: интенсивность дождя не превышать для легких почв 1,0 мм/мин и тяжелых 0,2-0,3 и значение нормы полива должно уменьшаться по мере дождевания до 150-400 м³/га [45], что технологически трудно выполнимо. Кроме того, увеличивается коэффициент потерь на испарение.

Также, в качестве технологического приема рекомендуется применение влагозарядковых поливов, позволяющих накопить влагу заранее и снизить норму полива при одном обороте дождевальной машины в вегетационный период, увеличив скорость ее движения.

В целом, для установления сроков вегетационных поливов на практике применяются различные методы: по влажности почвы; по фазам вегетации растений; по метеорологическим, физиологическим и другим показателям.

Наиболее высокий урожай все культуры дают при влажности почвы, близкой к НВ. Поскольку технически трудно, особенно при значительной длине машины обеспечивать растения таким запасом почвенной влаги в необходимое время, полив дают при нижнем пороге влажности, который не оказывает заметного отрицательного действия. А начало первого полива назначается с некоторым опережением от расчетного срока.

Однако такой способ полива подразумевает некоторое превышение поливной нормы на первых секторах орошаемого поля. Время полива постоянной поливной нормой не всегда соответствует требуемым влагозапасам, возникает перерасход оросительной воды, что требует оптимизации выдачи норм полива.

2.3 Схемы расстановки дождевателей

Структура и интенсивность дождя являются одними из определяющих параметров при конструировании дождевальных машин и во многом определяются конструкцией рабочих органов – дождевателей и расположением их вдоль трубопровода машины. Для снижения энергоемкости и обеспечения приемлемого качества полива потребовалось совершенствование конструкции дождевателей, работающих при низком давлении и схем их расстановки по длине водопроводящего трубопровода дождевальных машин.

Уменьшение интенсивности дождя на ДМ «Кубань» достигалось применением дефлекторных насадок на открьлках, обеспечивающих рассредоточение дождя [74].

Для низконапорной ДМ «Фрегат» были разработаны различные дождеваль-ные аппараты и способы их регулирования. Предложены ряд комбинированных схем расстановки дождевателей [62]. Суть состоит в том, что в начале и конце ДМ на 1/6 – 1/8 длины трубопровода располагают аппараты второй серии, а в середине, учащенно через 2,5 м, короткоструйные насадки секторного действия (типа ДМ «Кубань»).

Для обеспечения бесстокового полива предлагались варианты в зависимости от уклона и типа почвы, табл. 2.5.

Таблица 2.5 – Расстановка дождевателей

Уклон	Вид почвы	Расстановка
до 0,05	высокой водопроницаемости	разреженная расстановка аппаратов первой, второй и третьей серий
до 0,05	низкой водопроницаемости	расстановка аппаратов. В концевой части машины учащенно – через 2,5 м;
до 0,07	всех типов почв	укороченные машины с аппаратами первой и второй серий без концевого аппарата

Вариант комбинированного способа расстановки среднеструйных дождевальных аппаратов был апробирован на ДМ «Кубань-ЛК» согласно двум схемам:

- серийная, с интервалами между дождевальными аппаратами третьей серии 7,5-10 м в концевой части;
- с интервалами между дождевальными аппаратами второй серии в 2,5 м.

В качестве недостатков следует отметить увеличение крупности капель к концу трубопровода и увеличение интенсивности дождя до 30%, за счет снижения дальности вылета струи.

Известна схема размещения на водопроводящем трубопроводе низконапорной ДМ «Фрегат» короткоструйных секторных насадок из полиэтилена через 2,7 м. Аналогичный вариант применялся в Казахстане, где насадки располагались через 3 метра друг от друга. Для базовой машины их количество составило 143 шт. [74]. Оснащение короткоструйными дождевателями позволило повысить равномерность увлажнения почвы за счет улучшения структуры и качества дождя.

Следует также отметить работы ВолжНИИГиМ [59-60]. Для качественного распыливания с одновременным уменьшением энергетического воздействия капель дождя на почву и растения была предложена комбинированная схема с применением среднеструйных ДА № 2 и короткоструйных дождевателей секторного действия, а также установка дождевателей дефлекторного типа на устройствах приповерхностного полива, с улучшенными характеристиками.

А.И. Рязанцев для обеспечения эрозийно-безопасных технологий полива ДМ кругового действия обосновал и рекомендовал следующие схемы расстановки дождевателей в зависимости от типа рельефа [61], рис. 2.3:

1 Схема. Для спокойного рельефа и всех типов почв. Дождевальные аппараты устанавливаются в начале машины (серия №1) и учащенно (серия №2) в ее концевой части, а между ними короткоструйные насадки. В начальной части дождевальные аппараты устанавливаются в целях обеспечения необходимой интенсивности дождя и исключения забиваемости сопел.

2 Схема. Для уклонов до 0,05 и почв высокой водопроницаемости. По длине машины разрежено устанавливаются дождевальные аппараты серии №1, 2, 3 (серийная схема).

3 Схема. Для уклонов до 0,05 и почв низкой водопроницаемости. По длине машины вначале разреженно устанавливаются аппараты серии №1 и 2, а в конце, учащенно аппараты серии №2.

4 Схема. Для уклонов до 0,07 и всех видов почв рекомендуется та же схема расстановки дождевателей, что и в предыдущем варианте, только для длин машин не более 300 м и их малорасходных модификаций, без концевой дождевальной аппаратуры.

Все приведенные выше модернизации отличаются друг от друга конструкциями и материалами изготовления дождевальных насадок, их количеством, схемами расстановки.

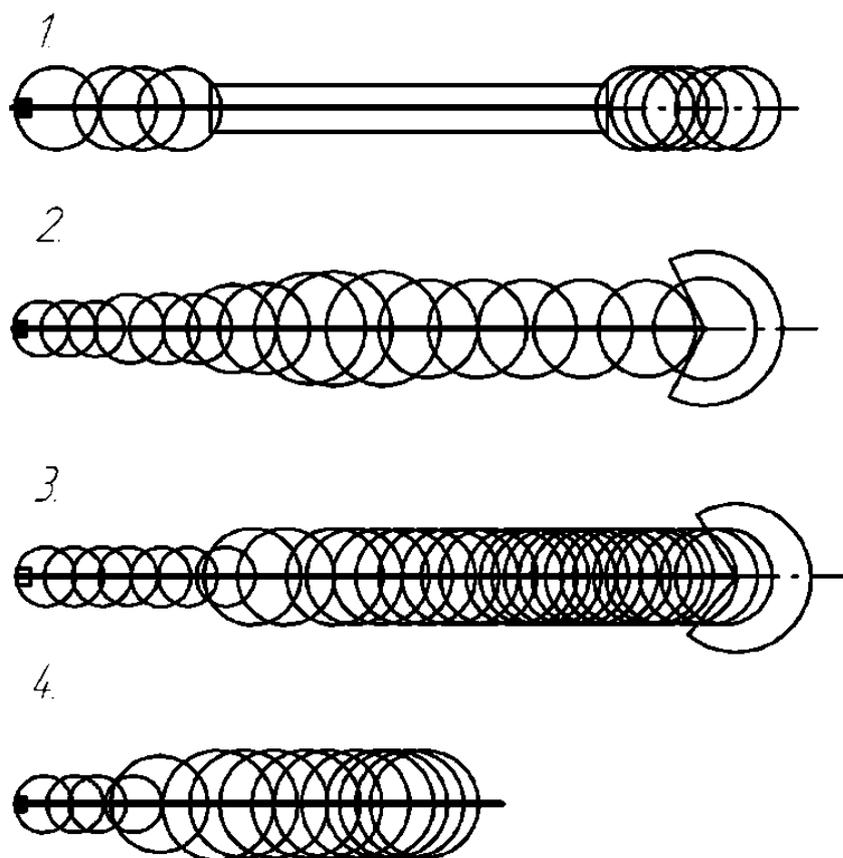


Рисунок 2.3 –Схемы расстановки дождевателей для обеспечения эрозийно-безопасных технологий полива

Основной проблемой была доработка конструкции водопроводящего пояса стандартной дождевальнoй машины вoвне заводских условий, поскольку варианты разрабатывались для стандартных дождевальных машин с уже имеющимися штуцерами на водопроводах.

Необходима разработка новой низконапорной дождевальной техники, обеспечивающей бесстоковый полив и высокие качественные показатели.

2.4 Влияние уклона на качество полива

Существенное влияние на равномерность распределения оросительной воды по полю оказывают гидравлические характеристики дождевальных машин, а также особенности места размещения ДМ или условия и рельеф конкретного участка.

По данным ВНПО «Радуга» на характер пьезометрической линии ДМ «Кубань» влияет даже прогиб водопроводящего трубопровода. Неравномерность распределения расхода по пролетам составила 2,88-7,07 %. Максимальное отклонение расхода от заданных параметров 18,7 – 22,16 % приходится на насадки около опорных тележек.

Существенное влияние на равномерность распределения воды оказывают и уклоны. Для компенсации таких воздействий предлагаются специальные схемы расстановки дождевальных аппаратов.

Круговые машины, состоящие из 10 пролетов, допускается эксплуатировать на местности с уклоном до 0,01-0,015 [56-58]. Номинальный расход составляет 70 л/с при давлении 0,35 МПа. Орошаемая площадь может достигать 73 га, что соответствует радиусу полива 483 м.

Согласно исследованиям Рязанцева А.И. расход воды на участках со сложным рельефом при движении ДМ по кругу изменяется в зависимости от расположения основной опоры по отношению к водопроводящему поясу. На пересеченном участке разница в расходе составляет порядка около 1-2%. На постоянном склоне разница по расходу для «Кубань-ЛК1» может достигать 15-18% [61].

Производители ДМ в случае разности расхода воды более 10% рекомендуют [32 37, 71] использовать регуляторы давления. Минимальный перепад высот, требующий применения регуляторов давления, составляет 2 м, с учетом большой длины машины (от 120 м), что несколько завышено.

В таблице 2.6 [71] представлены данные, как колебания рельефа местности влияют на рабочее давление в водопроводящем трубопроводе.

Из таблицы 2.6 видно, каждое увеличение уклона на 0,7 м требует повышения рабочего давления на 0,07 МПа. Т.е. при превышении отметки водопроводящего пояса машины над отметкой основной опоры требуется либо повышение рабочего давления, либо установка регуляторов давления.

Таблица 2.6 – Давление на входе ДМ длиной 400 м при работе на уклонах*

Уклон, м	Рабочее давление машины, МПа**				
	0,041	0,068	0,136	0,204	0,272
% колебания давления					
0,7	16,5	10,0	5,0	3,3	2,5
1,4	33,0	20,0	10,0	6,6	5,0
2,1	50,0	30,0	15,0	10,0	7,5
2,8		40,0	20,0	13,0	10,0
3,5		50,0	25,0	16,6	12,5
4,2			30,0	20,0	15,0
4,9				23,0	17,5
5,6				26,6	20,0

Примечание:

*Колебание давление не должно превышать 20%.

** Давление на насадке дождевателя

Из таблицы 2.6 видно, каждое увеличение уклона на 0,7 м требует повышения рабочего давления на 0,07 МПа. Т.е. при превышении отметки водопроводящего пояса машины над отметкой основной опоры требуется либо повышение рабочего давления, либо установка регуляторов давления.

Низконапорные регуляторы позволяют машине работать при минимальном давлении. Однако потери давления внутри самого регулятора могут составлять от 0,02 МПа и более. Т.о., давление на входе в регулятор должно на 0,02 МПа превышать давление, заданное на регуляторе [71].

Следует учитывать, что когда расход значительно изменяется в течение вегетационного сезона, то при падении давления воды для работы регуляторов ниже необходимого, коэффициент эффективного полива будет падать. И наоборот, при высоком рабочем давлении затраты на подачу воды будут неоправданно высокими.

От подбора регуляторов давления зависят величина рабочего давления и общее энергопотребление машины.

Н.С. Ерхов и О.В. Кантор [45] доказывают, что уклон влияет на показатель свободного впитывания (до образования стока) лишь после превышения критического значения уклона ($i_{кр} = 8-16\%$), который прямо пропорционален показателю впитывания P_0 :

$$i_{кр} = P_0 / 4,7 + 2, \quad (2.5)$$

Зависимость показателя свободного впитывания от уклона (до 40%) аппроксимируется прямой и выражается формулой

$$P_i = P_0 - C (i - i_{кр}), \quad (2.6)$$

где: C – параметр, характеризующий степень влияния уклона на показатель свободного впитывания.

Дождевание участков с уклонами 0,01-0,02 высокоинтенсивными машинами предлагается проводить непрерывно с поливной нормой не выше 300 м³/га [45].

В некоторых исследованиях для увеличения впитывающей способности почв и полива дождеванием без поверхностного стока предлагается прерывистый полив, что позволит выдать без стока объем воды в 3-4 раза больше и при перерывах от 10 до 30 мин, в 1,25-2,2 раза. Прерывистое дождевание особенно эффективно при дождевании на уклонах. В частности, прерывистое дождевание короткоструйными аппаратами дало повышение поливной нормы до стока в сравнении с непрерывным в 3-5 раз [63].

Согласно исследованиям [64], сравнение прерывистого дождевания с непрерывным, показало, что при перерывах от 10 до 30 мин., на уклонах поливаемой площади от 5° до 22°, скорость впитывания увеличивается в среднем в 1,25 – 2,0 раза. Применяя трехкратное и двукратное регулирование дождя на уклонах 0° - 15°, можно дать поливную норму от 265 до 540 м³/га. Однако может значительно увеличиваться время полива. Т.о. актуальным является оценка влияния уклона на качество дождевания и разработка технико-технологических рекомендаций.

3. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ НА ОСНОВЕ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

3.1 Этапы создания дождевальных машин

Процесс разработки новых образцов дождевальной техники включает в себя много этапов, основными из которых являются: выполнение научно-исследовательских (НИР), опытно-конструкторских (ОКР) и технологических работ, опытное производство, а также выпуск первой промышленной партии (рис. 3.1).



Рисунок 3.1 – Схема циклов процесса создания новой ДМ

Степень новизны дождевальной техники, при этом, может быть разной:

- конструкции усовершенствованные и частично измененные;
- принципиально новые конструктивные решения;
- частично измененные технологические процессы, повышающие эффективность работы машины.

Как правило, целью исследования является поиск новых конструктивных решений, превосходящих уже существующие по основным технико-экономическим качествам. Тем не менее, при разработке даже новой конструкции опираются на уже существующие.

За последнее десятилетие значительно повысились технико-экономические показатели дождевальных машин, увеличивается степень автоматизации, эксплуатационная надежность, появляются новые машины одинакового назначения, но принципиально иных конструктивно-компоновочных схем.

Выбору параметров должно предшествовать полное исследование всех факторов, определяющих конкурентоспособность машины. Необходимо изучить опыт выполненных зарубежных и отечественных машин, провести сравнительный анализ их достоинств и недостатков, выбрать правильные прототипы, выяснить тенденции развития и потребности данной отрасли сельского хозяйства.

Рассмотрев варианты технологических процессов, необходимо выбрать наиболее экономичный из вариантов. Поэтому выбор ресурсосберегающего технологического процесса заключается в оптимизации каждой операции по минимуму потребления материальных, трудовых, энергетических ресурсов (рис. 3.2) [29].

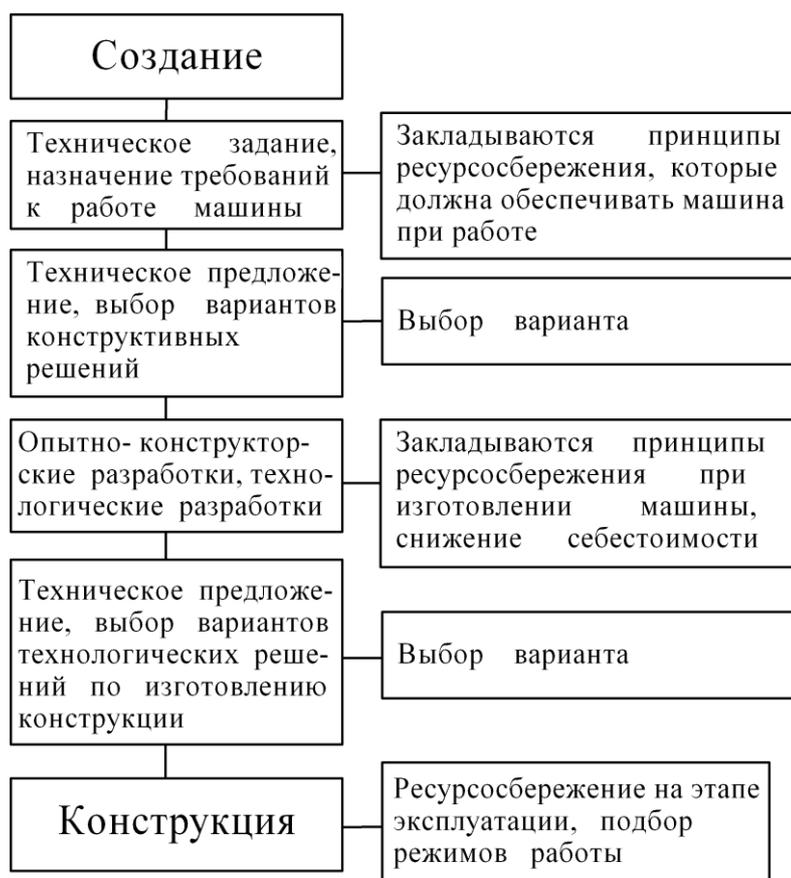


Рисунок 3.2 – Ресурсосбережение на этапах создания

Важным показателем является снижение себестоимости, связанное с применением лучшего технологического процесса. Для упрощения расчетов экономии определяется и сопоставляется не полная, а технологическая себестоимость, включающая только те элементы затрат на изготовление, величина которых различна для сравниваемых вариантов.

Заключительным этапом является подбор режима работы машины, обеспечивающего наибольшую экономию ресурсов. Для дождевальных машин это режимы обеспечивающие наиболее экономное расходование воды и электроэнергии.

3.2 Разработка новых образцов дождевальной техники

Новые эффективные технические средства полива были апробированы и внедрены в СГАУ имени Н.И. Вавилова совместно с ООО «Мелиоративные машины».

Этапы создания и модернизации дождевальных машин включали в себя этап исследовательских работ и поисково-прикладных исследований, на котором были запатентованы ряд дождевателей и других устройств.

На этапе опытно-конструкторских работ были созданы чертежи новых конструкций ДМ и опытных образцов, элементов конструкций, макеты, опытный образец машины (рис. 3.3-3.4).

На этапе освоения производства были разработаны: кондукторы для изготовления водопроводящего трубопровода, обеспечивающие точность размеров и пространственную ориентацию элементов креплений, водоотводов, фланцев (рис. 3.5), а для изготовления опорных тележек, обеспечивающие точность установки редукторов, необходимые углы наклона балок и др. (рис. 3.6).

Первая разработанная и внедренная модель ДМ – «Кубань-ЛК1М» (КАС-КАД) с техническими характеристиками представленными в таблице 3.1 (рис. 3.7- 3.8) [29].

Развитие и совершенствование машины получило при разработке серии ДМ «КАСКАД» с усовершенствованной конструкцией фермы, системы креплений, опорных тележек и увеличенными пролетами 59,5 и 65,2 м при диаметре трубопровода 159 мм (рис.3.9) [29].

В настоящий момент пролет 65,25 м с трубой диаметром 159 мм – самый длинный пролет с одноточечной схемой креплений шпренгелей в отрасли, рис. 3.10. Пролет на 0,32 м длиннее Reinke и имеет большее сечение трубопровода, а соответственно и производительность. Самый длинный пролет Reinke 64,93 м, где в качестве трубопровода используются трубы диаметром 152 мм [29].

Максимально допустимые уклоны местности:

стандартная колесная база: продольный уклон – 8-10% (зависит от длины пролета и диаметра трубопровода); поперечный уклон – до 12%



Рисунок 3.3 – «Кубань-ЛК1М» (опытный образец) и демонстрационный макет машины



Рисунок 3.4 – Элементы конструкции «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)



Рисунок 3.5 – Кондуктор изготовления водопроводящего трубопровода

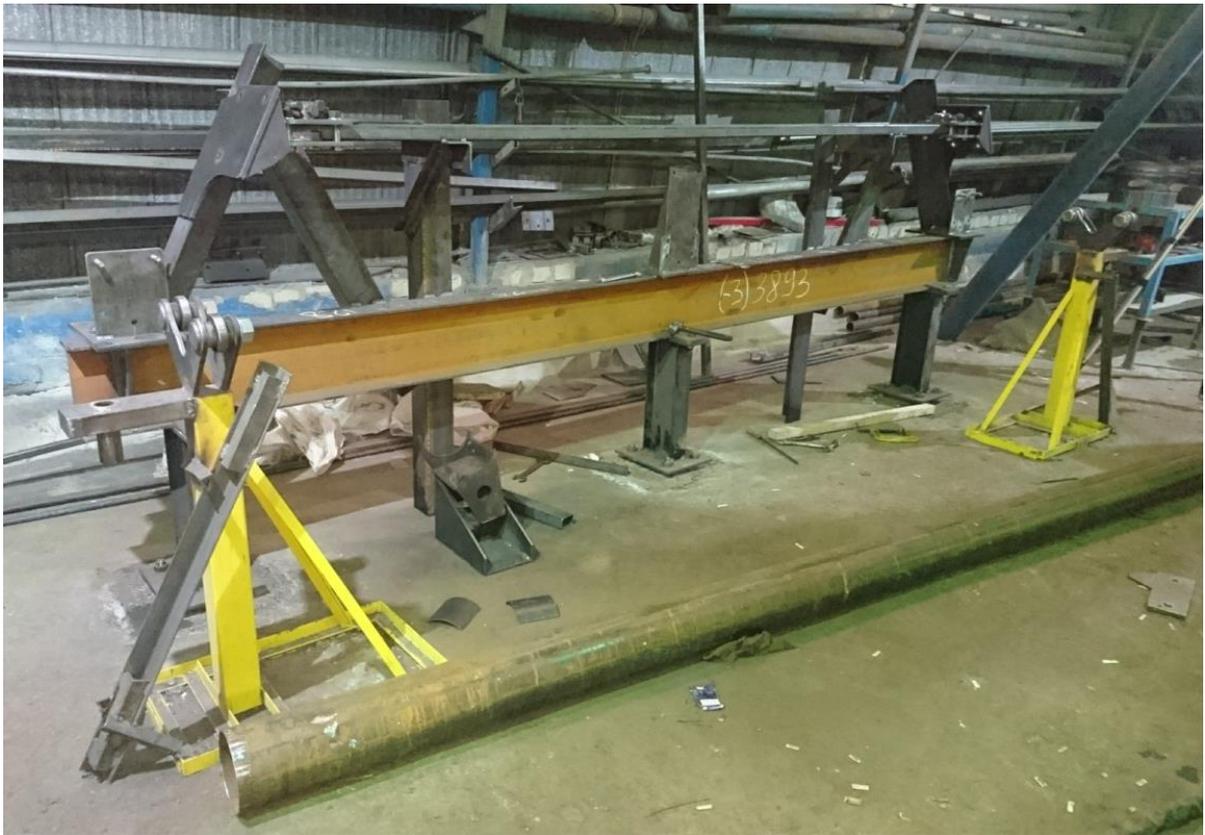


Рисунок 3.6 – Кондуктор изготовления опорных тележек



Рисунок 3.7 – Монтаж «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)

Таблица 3.1– Основные технические характеристики машины «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и «КАСКАД»

Наименование показателей	Показатель	
	1	3
Условное наименование	«Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)	«КАСКАД»
Привод передвижения машины	Колесная, многоопорная, электрифицированная, кругового перемещения, с забором воды от закрытой оросительной сети или из скважины	
Источник питания	Электромеханический, реверсивный, индивидуальный для каждой тележки, от мотор-редуктора	
Скорость движения последней тележки, регулируемая в пределах, м/с, (м/мин)	Внешняя трехфазная сеть с глухозаземленной нейтралью номинальным напряжением 380 в, 50 гц	
Дорожный просвет, мм, не менее	1,6x10 ⁻³ (0,1) – 30,0x10 ⁻³ (1,8)	
Расстояние от поверхности земли до нижнего пояса металлоконструкции, м	450	
Комбинированность	2,7	2,8 –2,9
Механическая повреждаемость растений, %, не более	Могут вноситься жидкие и растворимые минеральные удобрения, химмелиоранты, почвенные гербициды	
Способ дождевания	1,0	
Тип водопроводящего трубопровода	В движении машины по кругу по направлению и против направления движения часовой стрелки	
Диаметры водопроводящего трубопровода, мм	Секционный, ферменной конструкции	
Диаметры труб консоли, мм	159	219, 203, 168, 159, 133
Длины пролетов, м	133	133, 114, 108, 89
	48,7	48,7; 53,7; 59,5; 65,25

Количество опорных тележек, шт	1-10	1-10 (8 пролетов по 65,25 м и консоль 31м)
Максимальная длина машины, м (с консолью 31м)	518	553
Диаметры стояка неподвижной опоры, мм	168, 203	168; 203; 219; 244,5; 273
Колесная база	3700	3700, 4200
Максимальная длина консоли, м	31	31
Остановка машины в заранее заданном оператором месте	автоматическая	
Расход воды при нулевом общем уклоне, л/с	до 90	
Давление воды на входе в машину МПа при длине 500 м	0,43	
Колеса самоходных тележек:	пневматические, камерные по два колеса на каждой тележке	
Мотор-редукторы	УМС	
Колесные редукторы самоходных тележек, тип	червячные	
Расположение органов оперативного управления	– щит управления на неподвижной опоре; – дистанционный пульт управления внешней оросительной системы	
режимы работы машины GSM управление	– в движении с поливом; – в движении без полива (перегон) опция	
режимы движения машины	непрерывный, старт-стопный (программный)	
Интенсивность дождя средняя, мм/мин не более	0,66	
Норма полива за проход (в пределах регулирования), м ³ /га	95-600	
Минимальное время полного оборота машины, ч, при максимальной длине 500 м	32,8	
Ходовые системы	с возможностью регулировки угла поворота и поворота при буксировки как опция	



Рисунок 3.8 – «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) в работе



Рисунок 3.9 – Дождевальная машина КАСКАД в работе

В настоящий момент пролет 65,25 м с трубой диаметром 159 мм – самый длинный пролет с одноточечной схемой креплений шпренгелей в отрасли, рис. 3.10. Пролет на 0,32 м длиннее Reinke и имеет большее сечение трубопровода, а соответственно и производительность. Самый длинный пролет Reinke 64,93 м, где в качестве трубопровода используются трубы диаметром 152 мм [29].

Максимально допустимые уклоны местности:

стандартная колесная база: продольный уклон – 8-10% (зависит от длины пролета и диаметра трубопровода); поперечный уклон – до 12%.

расширенная колесная база: продольный уклон – 10-14%;

поперечный уклон – до 14%.

Максимальная высота трубопровода над землей 4800 мм.



Рисунок 3.10 – ДМ «КАСКАД». Пролет 65,25м.

3.3 Разработка низконапорных дождеобразующих устройств

Краткий обзор исследований конструктивных и технологических параметров дождеобразующих устройств. Направления совершенствования

Как было сказано ранее, сбережение водных и земельных ресурсов зависят в первую очередь от улучшения качества полива, повышения равномерности увлажнения поливной площади, снижения интенсивности водоподачи, и определяются совершенством конструкции дождеобразующих устройств, правильным выбором конструктивного исполнения и основных параметров в зависимости от условий эксплуатации.

Подбору основных параметров дождеобразующих устройств посвящены работы многих ученых [14, 46] и др.

Основными вопросами исследования при дождевании являются: расход воды через сопло, радиус полива, средняя интенсивность дождя, распад струи на капли, испарение при дождевании, снос ветром и др.

Величина расхода воды и значения коэффициента расхода дождевателей рассмотрены в работах Б.М. Лебедева [46], Н.Ф. Рыжко, [60], М.А. Бубенчикова, Б.А. Васильева, В.Е. Хабарова и др.

По данным Б.М. Лебедева [46] коэффициент расхода можно принять равным $\mu=0,8$ – для дождевателей в виде насадок, кромка которых имеет фаску и $\mu = 0,9$ если, у насадок кромка отверстия закруглена.

Определение радиуса полива, влияние скорости ветра на величину радиуса полива и площадь захвата исследовали Н.П. Бредихин, Н.Ф. Рыжко[60], В.В. Вуколов и др.

Для дождевателей в виде дефлекторных насадок радиус захвата дождем при $0,2 < H_d/d_d < 2,0$ рекомендуется определять по известной формуле Б.М. Лебедева [46]:

$$R' = \frac{H_d}{0,43 + 1,4 \frac{H_d}{d_0}}, \quad (3.1)$$

где R' – радиус захвата дождем, м;

H_d – напор перед дождевателем, м вод. ст.;

d_0 – диаметр сопла дождевателя, мм.

Исследования показывают, что значения расхода воды и радиуса захвата дождем, зависят главным образом от напора, диаметра сопла, формы, размеров и формы дефлектора.

Общей проблемой является то, что в исследованиях приводятся данные частного характера для конкретных типов дождевателей и режимов работы и условий проведения эксперимента, большая часть полученных данных основывается на эмпирических зависимостях.

Вопросы распределения интенсивности дождя вдоль радиуса захвата дождевателем и расстановки дождевателей, определения рационального расстояния между ними рассмотрены Б.М. Лебедевым [46], А.Г. Васильевым, Н.Ф. Рыжко [60], Б.П. Фокиным [74] и др.

Многочисленные исследования были посвящены исследованию величин испарения при дождевании. Причем результаты исследований значительно отличаются в границах от 2 до 30%.

По данным [64] потери воды на испарение и снос при поливе при скорости ветра 1...2; 1,5...2,0; 2...3; 3...5 м/с составляет соответственно 13,7; 13,3; 17,6; 19,0 %.

Таким образом, в настоящее время накоплен достаточно большой опыт по определению параметров дождеобразующих устройств различных типов машин и дождевателей.

Тем не менее, нет обобщенного принципа расчета, критериев оптимизации конструкции дождеобразующих устройств и их применимости в зависимости от метеорологических условий, расположения их на водопроводящем трубопроводе машины, и это является актуальной задачей.

Основные факторы, влияющие на выбор параметров дождеобразующего устройства, можно разделить на две категории:

– природные факторы (климат, ветровой режим, тип и физико-механические свойства почвы, выращиваемые культуры);

– хозяйственные (производственные) факторы (вид дождевальнoй машины, определяющий напор, расположение дождеобразующего устройства на водопроводящем трубопроводе, высота установки дождевателя в дождеобразующем устройстве над поверхностью почвы).

Основными критериями оптимизации дождеобразующего устройства являются параметры самого дождевателя: диаметр сопла, форма и конструкция дефлектора, а также расположение дождеобразующего устройства по длине водопроводящего трубопровода и высота дождевателя в дождеобразующем устройстве над поверхностью почвы.

Для средних условий эксплуатации в начале трубопровода важную роль играют потери воды на испарение и равномерность полива, а в середине и конце трубопровода – норма полива до стока, интенсивность дождя, крупность капель и мощность дождя.

При выборе оптимальных параметров дождевателей, установленных на трубопроводе машины кругового действия, необходимо весь трубопровод условно разбить на участки полива с определяющими по важности показателями [29].

Теоретические исследования влияния конструктивно-технологических параметров дождеобразующих устройств на процесс формирования дождя

Рассматривая подачу воды через дождеобразующее устройство, определяющее в конечном счете радиус и качество полива, можно выделить три процесса взаимодействия (рис 3.11) [29]:

1. Прохождение воды по корпусу и соплу дождевателя.

Входящими параметрами являются гидравлические параметры потока воды из трубопровода.

Задающим параметром является конструкция дождевателя и сопла. Основными выходными параметрами являются скорость, диаметр струи, расход воды дождевателя.

2. Взаимодействие потока воды с дефлектором.

Входящими параметрами являются параметры потока воды из сопла.

Задающими является конструкция дефлектора (форма, статичность/вращение, наличие канавок, их геометрия и расположение, угол выхода струи к горизонту.)

Основными выходными параметрами являются форма потока (пленка, отдельные струи, отдельные капли) и параметры потока (скорость, направление, диаметр каплей) и др.

3. Сход пленки, струй или одиночных капель воды с дефлектора.

Входящим параметром является параметры схода потока с дефлектора (скорость, толщина пленки, форма).

Задающими фактором являются метеорологические параметры среды: скорость ветра, температура, влажность и др.

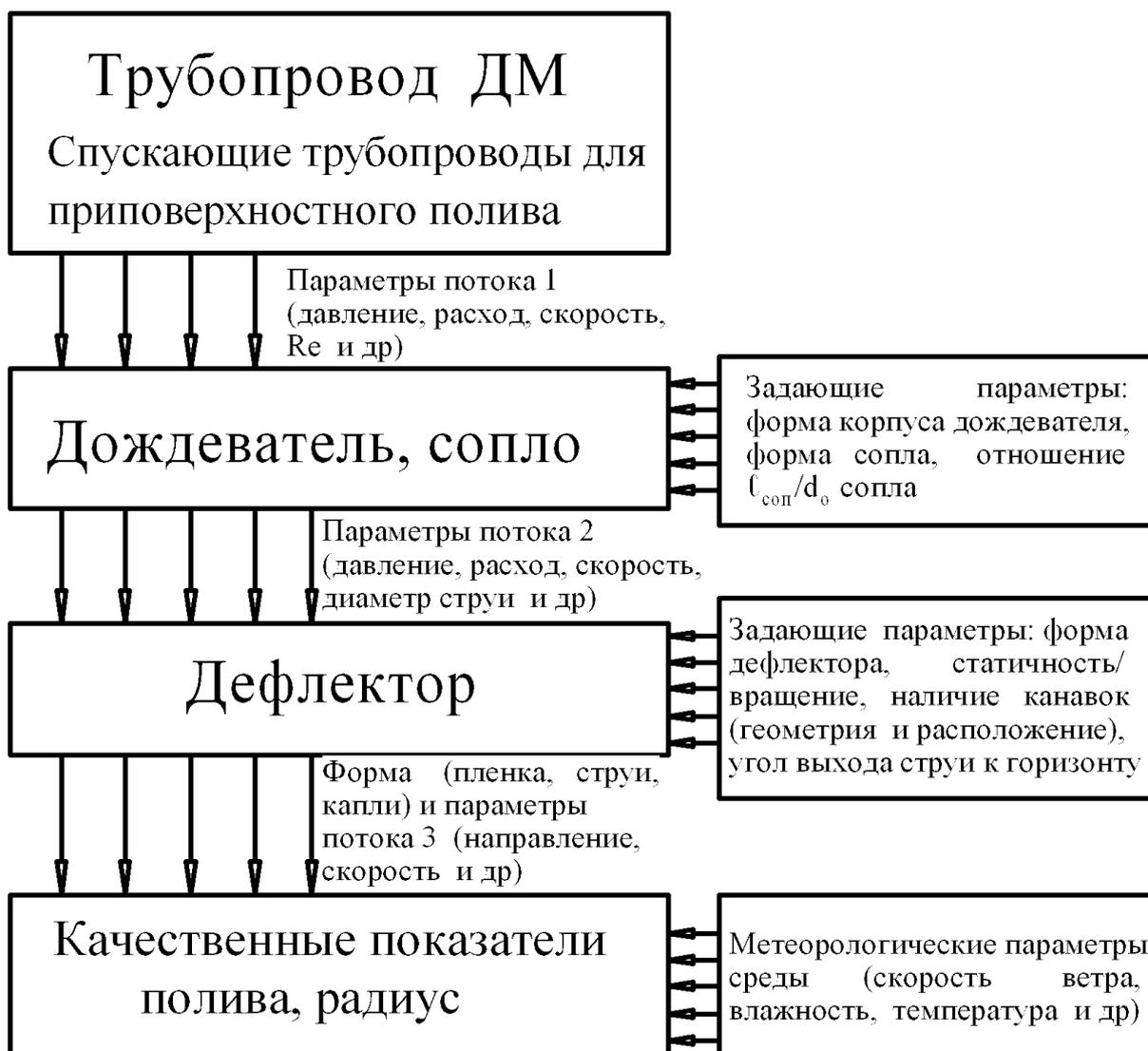


Рисунок 3.11 – Схема формирования характеристик дождя

Рассмотрим процессы взаимодействия потока воды и дождевателя в виде дефлекторной насадки более подробно. Корпус дождевателя представляет собой цилиндр. Струя при входе из него в сопло под действием центробежных сил сжимается, причем диаметр наиболее узкого сечения струи меньше входного

диаметра сопла. В зависимости от длины сопла, его формы и конфигурации входной кромки течение воды будет заметно отличаться (рис. 3.12) [50].

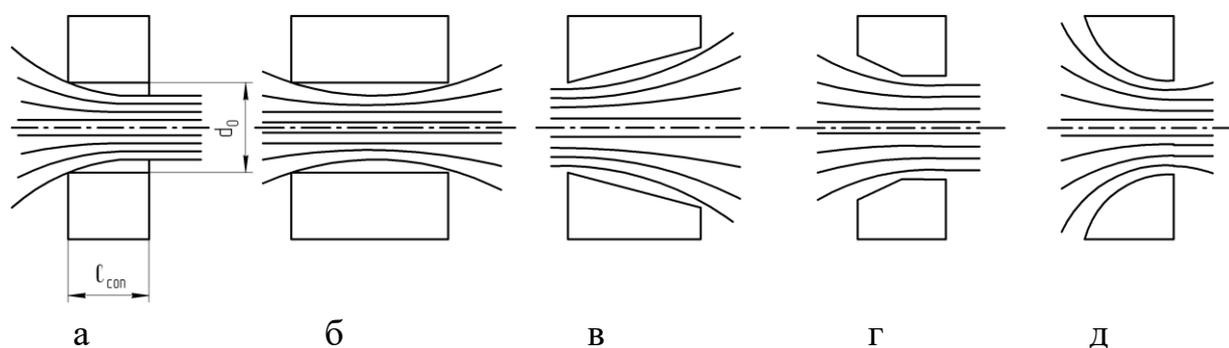


Рисунок 3.12 – Типы сопловых каналов: а – короткий цилиндрический; б – длинный цилиндрический; в – конический расходящийся; г – конический сходящийся; д – коноидальной входной кромкой

При небольшой длине сопла ($l_{\text{соп}}/d_0 < 1,5-2$) струя воды не касается стенок сопла (а). Коэффициент расхода устойчив к колебаниям перепада давления ($\mu=0,6-0,62$), коэффициент скорости при увеличении давления будет возрастать, а коэффициент сжатия струи уменьшаться [77], таблица 3.2.

Таблица 3.2 – Значения коэффициентов расхода μ , скорости φ и сжатия сечения ε для сопел различной формы [77]:

Сопло	φ	ε	μ
Короткое цилиндрическое	0,97	0,64	0,62
Длинное цилиндрическое	0,82	1	0,82
Конически расходящееся *	0,45-0,5	1	0,45-0,5
Конически сходящееся*	0,96	0,98	0,94
Коноидальное*	0,98	1	0,98

* – параметры отнесены к выходному сечению

При увеличении относительной длины $l_{\text{соп}}/d_0$ (б), струя, первоначально сжимается, затем расширяясь, заполняет сопловой канал. В области сжатия создается разрежение, увеличивая скорость в узком сечении; возрастает коэффициент расхода. Оптимальным является соотношение $l_{\text{соп}} = (3 - 4)d_0$ [77]. При дальнейшем увеличении длины увеличиваются потери на трение.

В соплах с коническим расходящимся соплом в области сжатия струи создается более глубокое разрежение, возрастающее с увеличением угла конусности. При углах более $5-7^\circ$ может произойти отрыв струи от стенок сопла [50]. В соплах такой формы наблюдаются значительные потери энергии – скорость истечения из них наименьшая.

Форма конически сходящихся сопел приближается к форме струи, практически устраняется сжатие и коэффициент скорости возрастает. Коэффициент расхода максимален при 13° .

Конoidalная форма сопла (д) практически совпадает с формой струи, обеспечивает минимальные потери энергии, но технологически более сложно в изготовлении.

Корневой угол невелик; по данным различных авторов, он находится в пределах от 5 до 20° в зависимости от типа соплового отверстия. Наименьший угол ($5-10^\circ$) у форсунок с длинным цилиндрическим каналом, а также каналом, имеющим конически сходящийся (5°) или конoidalный вход [50].

В дальнейших исследованиях, с учетом небольшого расстояния между соплом и дефлектором, принимаем форму струи, поступающей из сопла на дефлектор, цилиндрической формы.

Рассмотрим движение жидкости, вытекающей под давлением из дождевателя.

Начальная скорость струи, м/с, определяется как [50]:

$$V_0 = \varphi \sqrt{\frac{2(P_d - P_0)}{\rho_v}}, \quad (3.2)$$

где P_0 – давление атмосферы, МПа;

P_d – давление на выходе из сопла дождевателя, Па;

φ – коэффициент скорости истечения;

ρ_v – плотность жидкости (воды), кг/м³.

Расход, м³/с, можно также выразить по расходу через отверстие согласно выражению:

$$Q_H = \mu \omega_0 \sqrt{2gH_{ВХ}}, \quad (3.3)$$

где μ – коэффициент расхода;

ω_0 – площадь сечения сопла, м²,

$H_{ВХ}$ – напор на входе в дождеватель, м.

Механизм дробления потока, покинувшего сопло, зависит главным образом от формы вытекающей струи и скорости.

Непосредственным рабочим элементом дождевателя, осуществляющим передачу энергии необходимую для дробления поступающей на него воды является дефлектор. Характеристики распыла – размер факела, дисперсность определяются кинематическими параметрами дефлектора, в частности диаметром, формой, окружной скоростью. Распад струи или пленки воды происходит на сходе потока с дефлектора.

Задача дефлектора – создание определенной формы схода воды, т.е. тонкой пленки или струй равномерно по всему периметру и образованию определенного факела с минимальной разницей в размерах. Дефлектор формирует режим течения, задавая степень ее турбулизации и величину внутренних пульсаций, что способствует лучшему дроблению. Эти явления в настоящее время еще

недостаточно исследованы, однако прямо или косвенно наблюдаются на практике, в результате чего появилось значительное разнообразие конструкций дождевателей.

Жестко закрепленный статический гладкий дефлектор

Важное значение имеет определение толщины водяной пленки, сходящей с дефлектора конической формы, поскольку толщина пленки влияет на ее распад и расход дождевателя. Пленка, обтекающая дефлектор, принимает устойчивую коническую форму и на некотором расстоянии распадается на отдельные капли.

В большинстве исследований толщина пленки, а также силовое взаимодействие между жидкостью и дефлектором определяется без учета сил трения [7, 31, 46]. Т.е. толщина пленки на коническом дефлекторе и положение точки потери устойчивости пленки не зависят от скорости подачи струи жидкости на дефлектор [31, 46], что противоречит экспериментальным данным.

Рассмотрим обтекание осредненным турбулентным потоком жидкости дефлектора конической формы с углом при вершине 2β (рис. 3.13). Принимая давление избыточным, составим уравнение Бернулли для сечений 0-0, 1-1 относительно плоскости сравнения 0-0 [78]:

$$\alpha_0 \frac{V_0^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_0 + h_f, \quad (3.4)$$

где h_f – суммарные потери напора, определяемые работой сил трения на поверхности конического дефлектора и на поверхности раздела жидкость – воздух;

V_0, V_1 – средние скорости движения жидкости в сечениях 0-0 площадью $\omega_0 = \pi r_0^2$ и 1-1 площадью $\omega_1 = \pi \delta (2r + \delta \cos \beta)$, соответственно;

δ – толщина пленки в сечении 1-1;

α_0, α_1 – коэффициенты Кориолиса;

r_0 – радиус сопла дождевателя;

r – радиус конического дефлектора.

Суммарные потери напора по формуле Вейсбаха [77] имеют вид:

$$h_f = \zeta \frac{V_1^2}{2g}, \quad (3.5)$$

Полагая для турбулентного потока жидкости $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$, и исключив из уравнения (3.4) средние скорости жидкости через расход Q_H , выразим:

$$Q_H = m_0 \omega_0 \sqrt{2gz_0}, \quad (3.6)$$

$$\text{где } m_0 = \left[1 - (1 + \zeta) \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (3.7)$$

– коэффициент расхода системы [281], отнесенный к сечению 1-1;

ζ – полный гидравлический коэффициент сопротивления, учитывающий потери напора на поверхности конического дефлектора и на поверхности раздела жидкость – воздух.

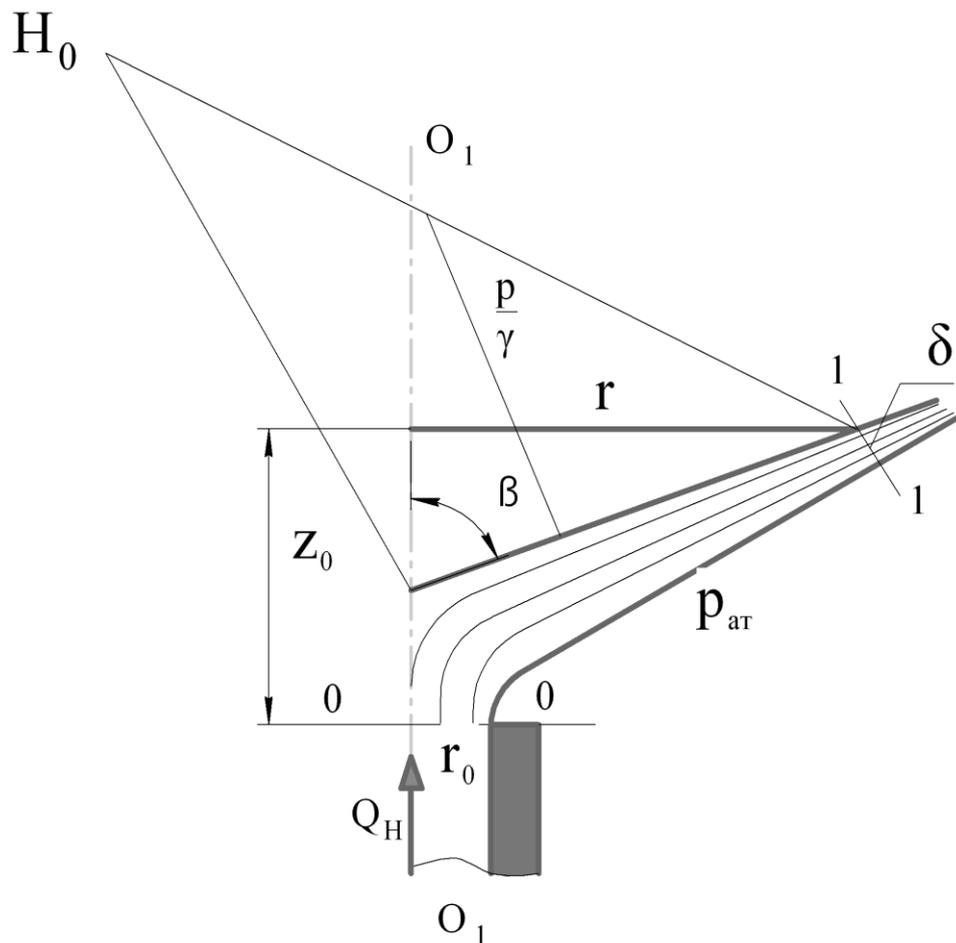


Рисунок 3.13 – Схема для определения толщины пленки жидкости

Поскольку, из (3.6) следует:

$$m_0 = \frac{Q_0}{\omega_0 \sqrt{2gz_0}} = \frac{V_0}{\sqrt{2gz_0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_0}{\sqrt{gz_0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{V_0^2}{gz_0}} = \sqrt{\frac{Fr_0}{2}}, \quad (3.8)$$

где Fr_0 – число Фруда набегающего потока.

Приравнявая выражения (3.7) и (3.8), находим уравнение для определения толщины пленки:

$$\delta^2 + \frac{2r}{\cos\beta} \delta - k_0 \frac{r_0^2}{\cos\beta} = 0, \quad (3.9)$$

где

$$k_0 = \sqrt{\frac{1 + \zeta}{1 - \frac{2}{Fr_0}}}, \quad (3.10)$$

– поправочный коэффициент, учитывающий работу сил трения и кинетичность набегающего потока жидкости;

График зависимости коэффициента k_0 от ζ и Fr_0 представлен на рис. 3.14.

График зависимости k_0 от кинетичности потока при различных значениях коэффициента сопротивления ζ представлен на рис.3.15.

Уравнения (3.9) принимает вид

$$\delta = -\frac{r}{\cos\beta} + \sqrt{\frac{r^2}{\cos^2\beta} + k_0 \frac{r_0^2}{\cos\beta}}, \quad (3.11)$$

Т.о. толщина пленки увеличивается при возрастании коэффициента сопротивления ζ и уменьшается при увеличении кинетичности набегающего потока.

При $k_0=1$ из формулы (3.11) можно выразить формулу А.П. Исаева [31], т.е. – это предельный случай обобщенной формулы (3.11) при $\zeta \rightarrow 0, Fr_0 \rightarrow \infty$.

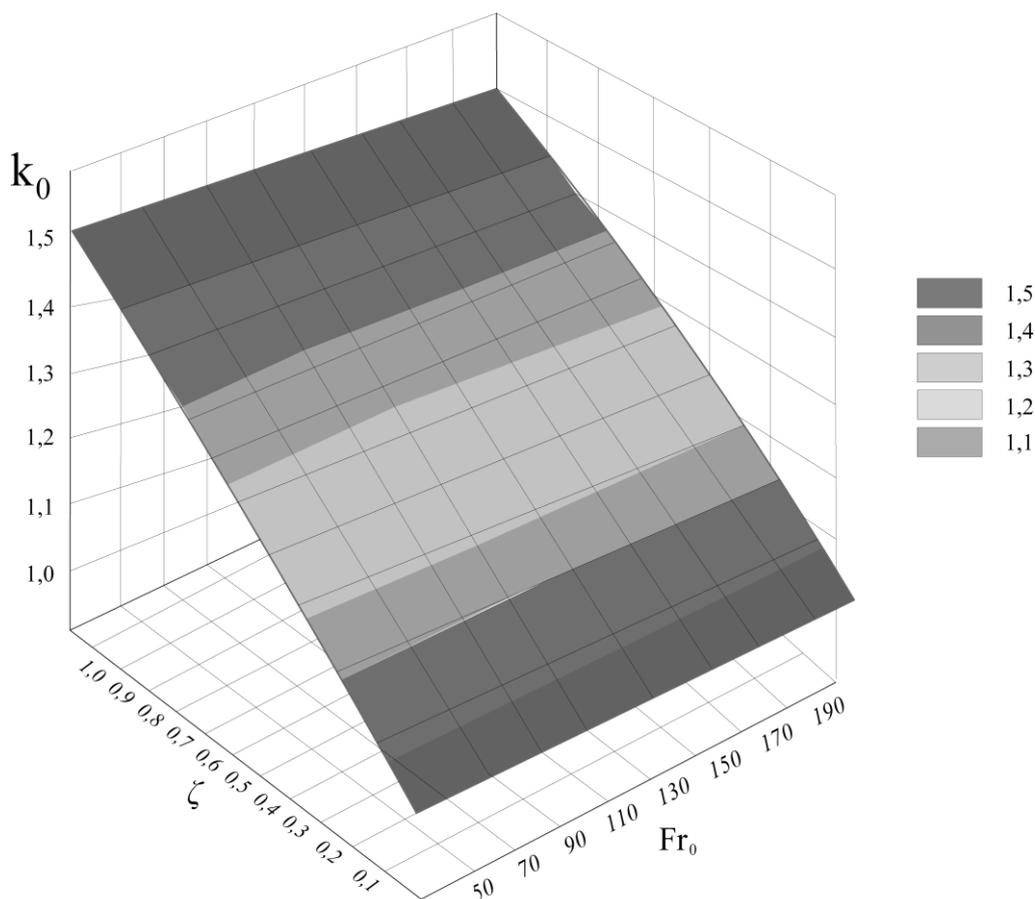


Рисунок 3.14 – Зависимость коэффициента k_0 от ζ и Fr_0

При $\beta=90^\circ$ из (3.9) толщина пленки определяется как:

$$\delta = 0,5k_0 \frac{r_0^2}{r}. \quad (3.12)$$

Выражение также является обобщением формулы [31].

Поскольку, как показывают экспериментальные исследования, числа Фруда в набегающем потоке имеют порядок десятков и даже сотен, коэффициент k_0 можно выразить через приближенную зависимость, используя разложение в асимптотический ряд функции

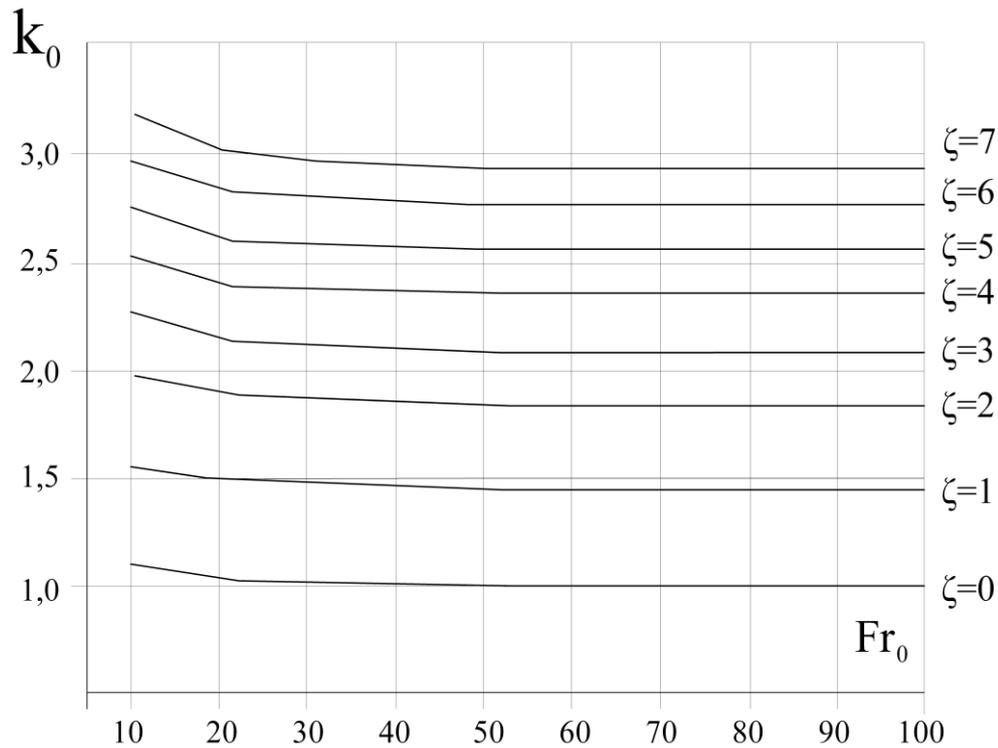


Рисунок 3.15 – Зависимость k_0 от кинетичности потока при различных значениях коэффициента сопротивления ζ

$$\left(1 - \frac{2}{Fr_0}\right)^{-1/2} \cong 1 + \frac{1}{Fr_0} - \dots \quad (3.13)$$

$$\text{Тогда } k_0 \cong \sqrt{1 + \zeta} \left(1 + \frac{1}{Fr_0} - \dots\right), \quad (3.14)$$

Считая $\zeta \ll 1$, формулу можно упростить:

$$k_0 \cong \left(1 + \frac{1}{2}\zeta + \dots\right) \left(1 + \frac{1}{Fr_0} - \dots\right) \approx 1 + \frac{1}{2}\zeta + \frac{1}{Fr_0}. \quad (3.15)$$

Преобразовав формулу (2.11) к безразмерному виду, получим:

$$\frac{\delta}{r} \cos\beta = \sqrt{1 + k_0 \left(\frac{r_0}{r} \sqrt{\cos\beta}\right)^2} - 1, \quad (3.16)$$

Зависимость (3.16) при различных значениях параметра k_0 представлена на графике (рис. 3.16).

Из рис. 3.14 и 3.15 видно, что коэффициент k_0 мало зависит от параметра кинетичности потока, а при числе Фруда $Fr_0 > 60$ практически не зависит (область автомодельности по числу Фруда).

Согласно выражению [6] сила динамического воздействия струи P на дефлектор конической формы определяется в виде

$$P = \rho_V V_0 \omega_0 (V_0 - V_1 \cos\beta), \quad (3.17)$$

где ρ_V – плотность жидкости, кг/м^3 .

Выражая среднюю скорость V_1 из уравнения (3.4):

$$V_1 = \frac{V_0}{\sqrt{1+\zeta}} \sqrt{1 - \frac{2}{Fr_0}} = \frac{V_0}{k_0}, \quad (3.18)$$

Подставив (3.18) в (3.17), получим:

$$P = \rho_B V_0^2 \omega_0 \left(1 - \frac{\cos\beta}{k_0}\right), \quad (3.19)$$

Наибольшее значение радиуса конического дефлектора r_{\max} , при котором возможно безотрывное обтекание жидкостью, можно получить из выражения (3.9) (рис. 3.17) [26]:

$$r_{\max} = k_0 \frac{r_0^2}{2\delta_{\max}} - \frac{\delta_{\max}}{2} \cos\beta, \quad (3.20)$$

Т.о. наибольшее значение радиуса r_{\max} зависит от полного гидравлического коэффициента сопротивления ζ , числа Фруда Fr_0 , радиуса сопла r_0 и угла конусности β .

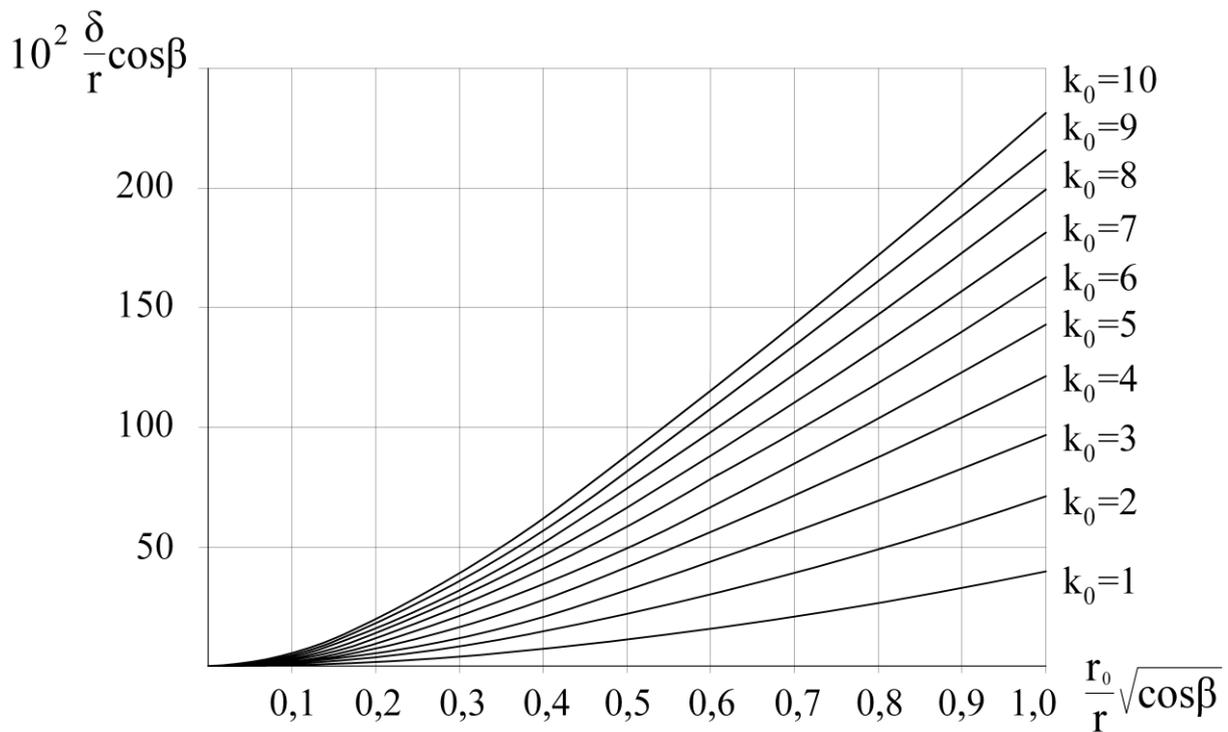


Рисунок 3.16 – Зависимость (3.16) при различных значениях параметра k_0

Каскадные дождеватели для приповерхностного полива

Увеличение производительности без изменения качества распыливания может быть обеспечено применением каскадных, многоярусных дождевателей (рис. 3.18) [29].

В каскадных дождевателях внешние слои струи воды «срезаются» последовательно установленными дефлекторами.

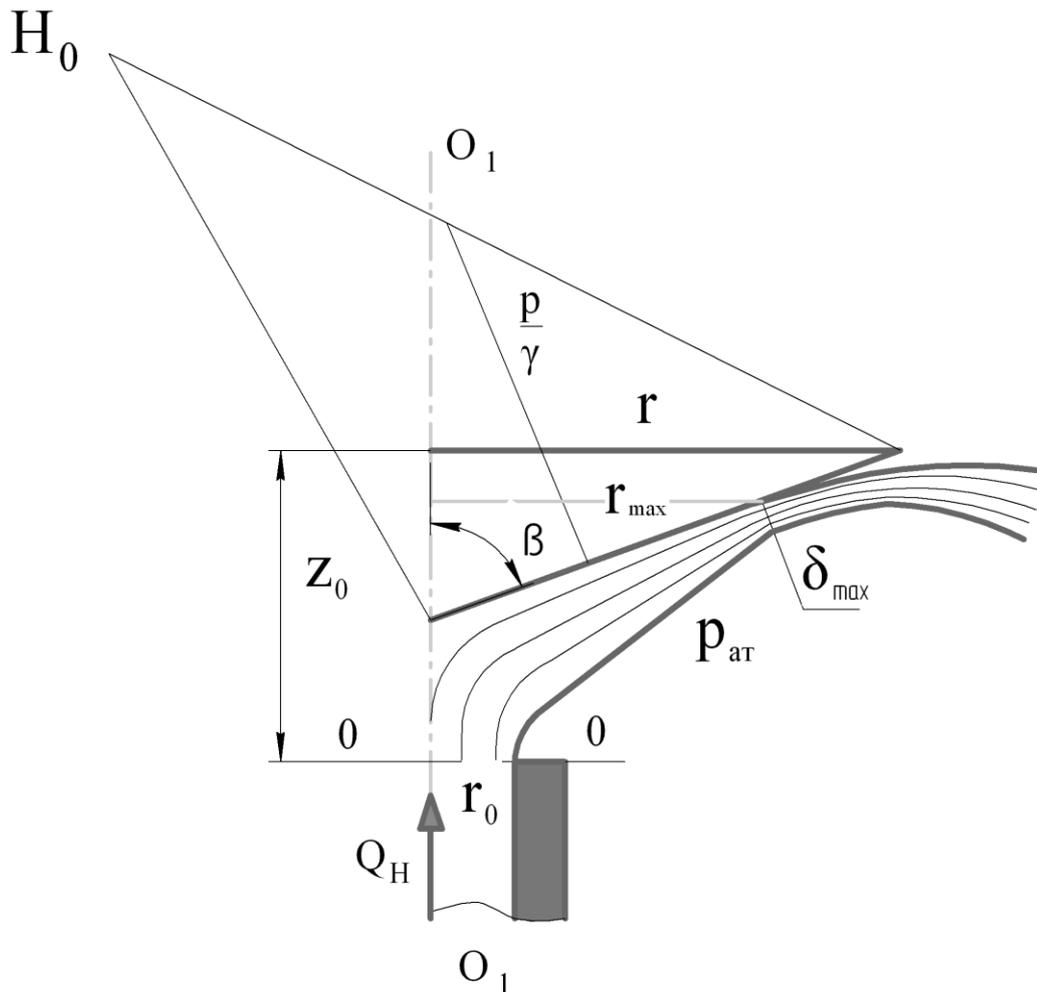


Рисунок 3.17 – Схема для определения максимального радиуса безотрывного течения

В каскадных дождевателях внешние слои струи воды «срезаются» последовательно установленными дефлекторами.

Принимая расход из сопла насадки как Q_H , $\text{м}^3/\text{с}$

$$Q_H = \mu \omega_0 V_0, \quad (3.21)$$

Расход, обеспечивающий сходящийся поток первого дефлектора определяется площадью кольца

$$Q_{1H} = \mu \pi (r_0^2 - r_{1K}^2) V_0, \quad (3.22)$$

r_0 – радиус сопла дождевателя, м;

r_{1K} – радиус отверстия первого дефлектора, м;

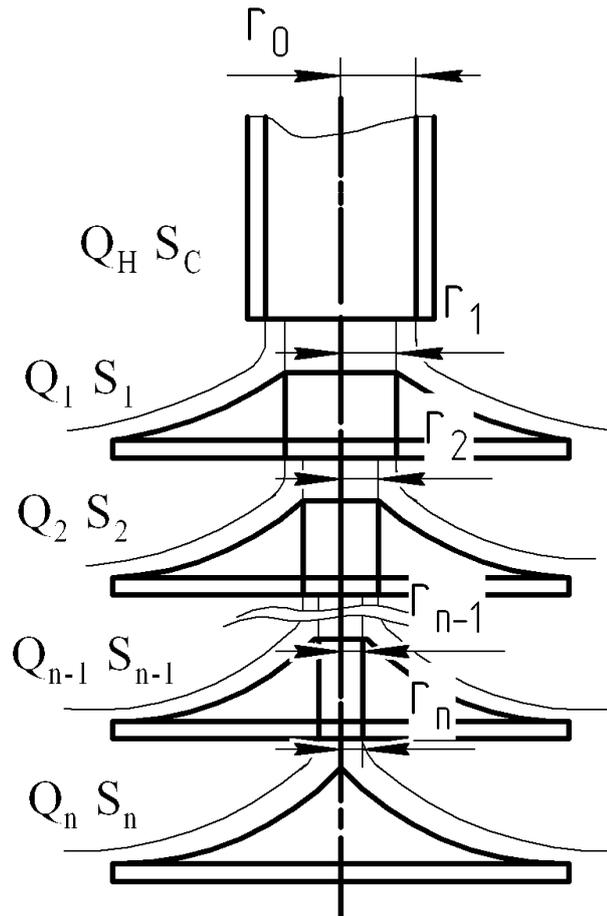


Рисунок 3.18 – Схема распределения расхода по дефлекторам каскадного дождевателя

Для второго дефлектора $Q_{2H} = \mu\pi(r_{1K}^2 - r_{2K}^2)V_0,$ (3.23)

r_{2K} – радиус отверстия второго дефлектора, м.

Для предпоследнего дефлектора $Q_{(n-1)H} = \mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2)V_0,$ (3.24)

Для последнего дефлектора $Q_n = \pi\mu r_n^2 V_0,$ (3.25)

$Q_H = Q_{1H} + Q_{2H} + \dots + Q_{(n-1)H} + Q_{nH},$ (3.26)

При обеспечении равного расхода с каждого дефлектора:

$Q_{1H} = Q_{2H} = Q_{(n-1)H} = Q_{nH} = \pi\mu(r_0^2 - r_{1K}^2)V_0 = \pi\mu(r_{1K}^2 - r_{2K}^2)V_0 = \pi\mu(r_{n-1}^2 - r_n^2)V_0 = \pi\mu r_n^2 V_0,$ (3.27)

$Q_H = n_K \mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2)V_0 = \mu\pi R_0^2 V_0,$ (3.28)

$\pi\mu(r_{n-1}^2 - r_n^2)V_0 = \pi\mu r_n^2 V_0,$ (3.29)

$r_n = 0,71r_{n-1},$ (3.30)

Т.о. зная радиус сопла дождевателя, подбираются параметры отверстий в дефлекторе для обеспечения равного расхода с каждого дефлектора. Соотношение радиуса сопла дождевателя и отверстия в дефлекторе также 1:0,71.

Соотношения диаметра сопла и отверстия в верхнем дефлекторе дождевателя представлены в таблице 3.3 [29].

Таблица 3.3 – Соотношения диаметров сопла и отверстия в верхнем дефлекторе

Диаметр сопла, мм	8	10	12	14	15
Диаметр отверстия верхнего дефлектора, мм	5	7	8	10	11
Диаметр отверстия второго дефлектора, мм	3,5	5	6	7	8

Применение каскадных дождевателей рационально при диаметре сопла более 10 мм, т.е. на трубопроводе длиной более 350 м во второй половине или последней трети трубопровода.

Размер образующихся капель d_k можно определить по эмпирической зависимости:

$$d_k = 4,71 \cdot 10^{-2} d_0 Ga^{-0,59} Fr_0^{-0,5}, \quad (3.31)$$

где Ga – критерий Галилея; Fr_0 – критерий Фруда.

$$Ga = \frac{gd_0^3 \rho_B^2}{\nu^2}, \quad (3.32)$$

d_0 – диаметр сопла насадки, м.

ρ_B – плотность жидкости (воды), кг/м³;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Резкое увеличение диаметра капель при снижении давления необходимо учитывать при выборе типа дождевателей, установленных в конце трубопровода машины, а также выборе регуляторов давления.

Вращающийся дефлектор для дождевателей приповерхностного полива

Рассмотрим взаимодействие жидкости с вращающимся дефлектором для дождевателей устанавливаемых на гибких спускных трубопроводах для приповерхностного полива.

Под действием центробежных сил вода течет по дефлектору и распыливается за его пределами. Конструктивными особенностями обеспечивается различный характер распределения воды по дефлектору.

Поток воды попадает в криволинейные каналы, изогнутые таким образом, что создается момент силы реакции вытекающей струи и дефлектор начинает вращаться вокруг оси, достигая определенной частоты. В дальнейшем поток поступает на вращающийся с определенной частотой дефлектор.

В процессе схода потока жидкости с дефлектора образуются наиболее однородные по размерам основные капли (первичные) и более мелкие капельки-спутники.

Для определения диаметра образующихся основных капель, исходя из условия равенства действующих на капельку центробежной силы и силы поверхностного натяжения σ , можно воспользоваться выражением Д.Г. Пажи [50]:

$$d_K = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{r\rho_B}}, \quad (3.33)$$

где ρ_B – плотность жидкости (воды), кг/м³;

ω – угловая скорость дефлектора, с⁻¹;

r – радиус дефлектора, м;

c – константа.

Справедливость соотношения проверена в диапазоне изменения ω от 30 до 1000 с⁻¹, r от 10 до 110 мм. В этом диапазоне изменения параметров значение c варьировалось в границах от 1,9 до 4,6 [50].

С увеличением окружной скорости размеры капель уменьшаются, что говорит о возможности установки дождевателя с вращающимся дефлектором с целью уменьшения диаметра капель.

Плотность орошения можно регулировать шириной, расположением и количеством канавок на дефлекторе, а размер орошаемой поверхности – высотой канавок и углом раствора.

Дефлекторы могут иметь радиальные или наклонно расположенные канавки. Траектория канавок на дефлекторе оказывает существенное влияние на формирование скорости и траектории полета капель воды.

В том случае, когда дефлектор снабжен канавками или проточками (рис. 3.19), выражение для определения скорости воды V_1 при выходе с дефлектора будет иметь вид [7, 29]:

$$V_1 = 0,75 \frac{\omega^{0,8} D'^{0,4}}{B^{0,4}} \left(1 - \frac{0,9}{B^{0,92} \omega^{0,42} D^{1,43}} \right)^{0,4}, \quad (3.34)$$

$B = 0,09 r_K^{0,35} \nu^{0,25} n_K^{0,8} Q_H^{-0,8}$ – для канавок в форме параболы,

$B = 0,105 b^{0,35} \nu^{0,25} n_K^{0,8} Q_H^{-0,8}$ – для прямоугольных канавок.

r_K – радиус канавки, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Q_H – объемный расход, м³/с;

n_K – число канавок на дефлекторе, ед;

D' – диаметр дефлектора, м;

b – ширина канавки, м.

Увеличение расхода при прочих равных условиях ведет к увеличению радиальной скорости схода потока для всех типов дождевателей, а соответственно радиусу захвата дождем (рис. 3.20).

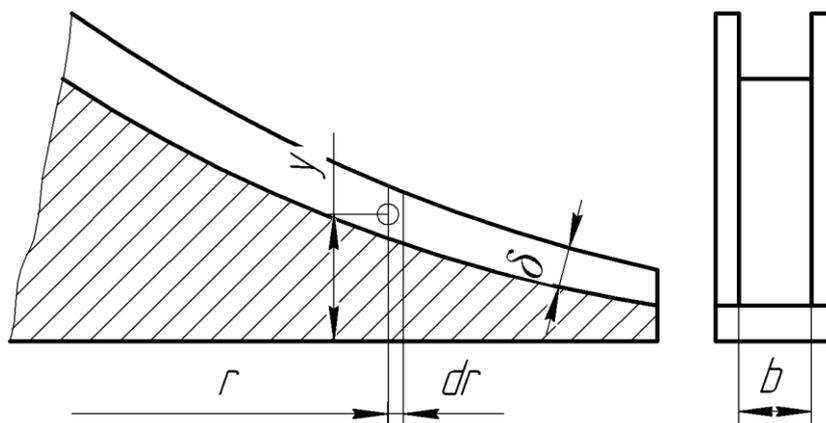


Рисунок 3.19 – Схема элемента вращающегося дефлектора: y – вертикальная координата; r – радиальная координата; δ – толщина пленки жидкости

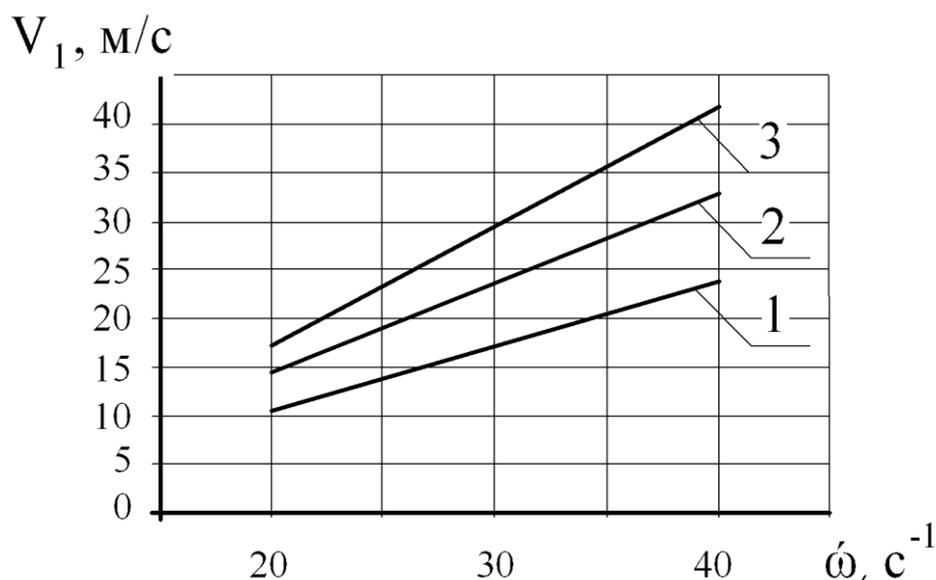


Рисунок 3.20 – Зависимость скорости V_1 от угловой скорости дефлектора ω при постоянных $r_K=1$ мм, $n_K=30$, $D'=0,06$ м: 1 – $Q_H=0,1$ л/с; 2 – $Q_H=1$ л/с; 3 – $Q_H=3$ л/с

Рассмотрим влияние размера и количества канавок на дефлекторе. Из рисунка 3.21 видно, что увеличение радиуса канавок при малых расходах ведет к снижению радиальной скорости на сходе с дефлектора.

Увеличение дефлектора в некоторой степени способствует увеличению скорости, однако диаметр ограничивается общими габаритами дождевателя.

Наибольшую скорость приобретает вода при выходе с вращающегося дефлектора, имеющего радиус канавок $r_K=3-5$ мм при расходе 2-3,5 л/с и мелкие канавки 1,5-2,5 мм, занимающие площадь всего дефлектора при малом расходе до 2 л/с [29].

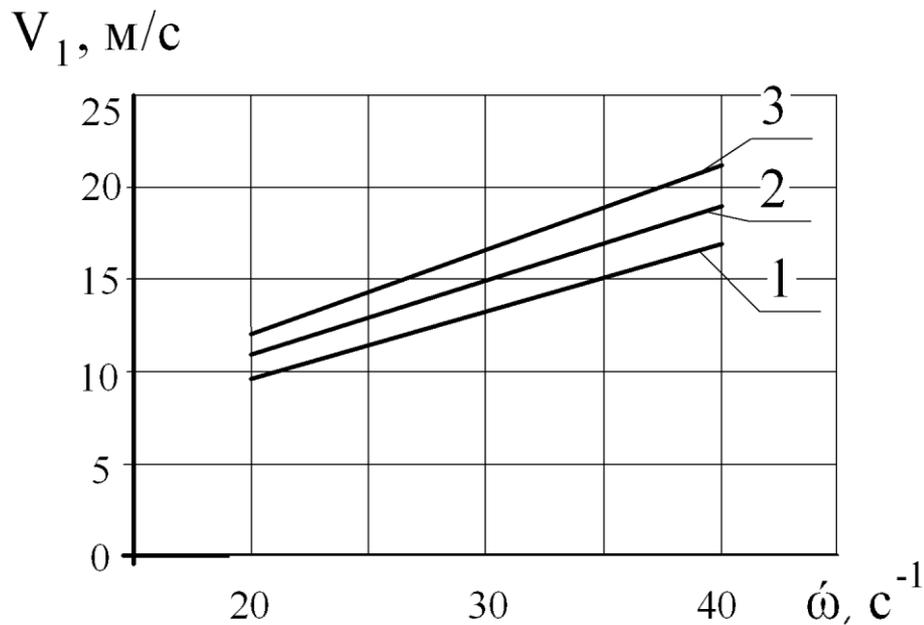


Рисунок 3.21 – Зависимость радиальной скорости V_1 от угловой скорости дефлектора ω при постоянных $n_K=40$, $D'=0,06\text{м}$, $Q_H=0,5\text{л/с}$: 1 – $r_K=5\text{мм}$; 2 – $r_K=2\text{мм}$; 3 – $r_K=1\text{мм}$

Параметры потока после схода с дефлектора

Далее при работе дождевателя можно выделить 3 участка струи. Участок сплошного потока 1 – (порядка 2...3 см), в некоторых случаях он может быть мал или отсутствовать, 2 – участок раздробленного потока, 3 – распыленный участок, где наблюдается полет отдельных капель дождя, что согласуется с исследованиями [7, 29, 60].

Поскольку образование капель начинается в начале частично раздробленной части или на сходе с дефлектора и заканчивается в распыленной части струи, то определить теоретически координаты начала движения и стартовые скорости тех или иных капель невозможно.

Согласно исследованиям [50] механизм дробления жидкости, покинувшей распылитель, зависит главным образом от формы вытекающей струи и соотношения скоростей струи и окружающего газа, которые в свою очередь определяются способом распыливания, классом и конструкцией дождевателя.

Определяющим фактором длины третьего участка, который в большинстве случаев и определяет радиус разбрызгивания, является скорость капель дождя, а также скорость и направление ветра.

Принимаем α_0' – угол вылета струи к горизонту, зависящий от формы дефлектора (рис. 3.22).

Капли дождя летят как независимые материальные точки, на которые действуют две силы: сила тяжести G' и сила сопротивления воздуха V_B' .

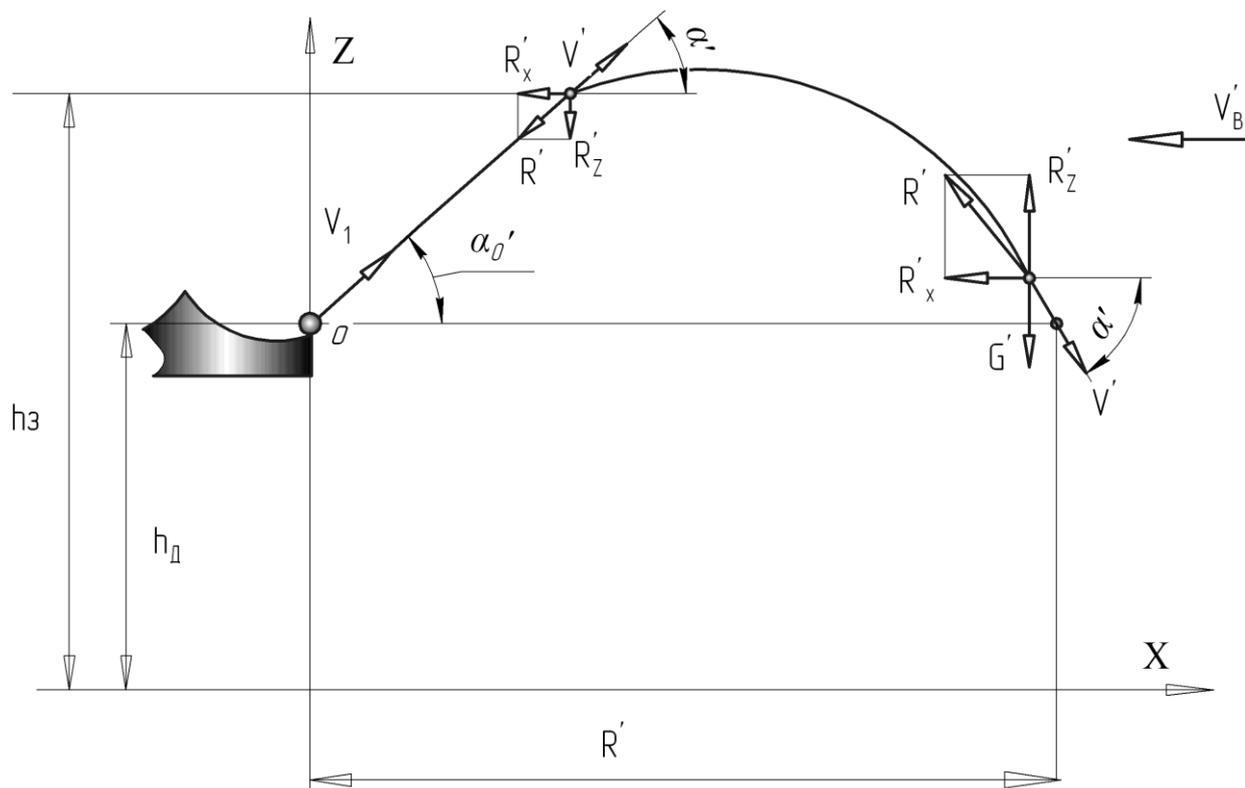


Рисунок 3.22 – Схема приложения сил и скоростей при сходе потока с дефлектора дождевателя

Дальность полета капель с учетом ветра можно определить из выражения:

$$R' = \frac{1}{k_C} (V_1 \cos \alpha' + V'_B \cos \beta') (1 - e^{-tk_C}) - (V'_B \cos \beta) t, \quad (3.35)$$

высота подъема :

$$Z = \frac{1}{k_C^2} \left[(g + k_C V_1 \sin \alpha') (1 - e^{-tk_C}) - \frac{g}{k_C} t \right], \quad (3.36)$$

где V_1 – скорость выхода струи с дефлектора, м/с;

m_K – масса капли;

k_C – коэффициент сопротивления среды;

g – ускорение свободного падения; t – время, с;

β' – угол между направлением движения капли и направлением ветра.

Рассмотрим влияние сопротивления среды.

Для диапазона чисел Рейнольдса $0 < Re < 10^4$ принята эмпирическая зависимость коэффициента лобового сопротивления k_C :

$$k_C = \frac{24}{Re} + \frac{4,565}{\sqrt[3]{Re}} - \frac{0,491}{\sqrt{Re}}, \quad (3.37)$$

Расчетное значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_1 d_K}{\nu_{\text{воз}}}, \quad (3.38)$$

где d_K – диаметр капли, м;

$\nu_{\text{воз}}$ – кинематическая вязкость воздуха, м²/с (при температуре воздуха 20°С $\nu_{\text{воз}}=15,7 \cdot 10^{-6}$ м²/с. Дальности полета капель в зависимости от наличия и направления ветра через 1с от начала движения представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Значение дальности полета капель в зависимости от наличия и направления ветра

Скорость V_0 , м/с	Диаметр капли d_k , мм	Коэффициент лобового сопротивления k_c	Дальность полета без ветра R' , м, (t=1с)	Скорость ветра V'_B , м/с	Дальность полета против ветра R' , м, (t=1с)	Дальность полета по ветру R' , м, (t=1с)
5	0,5	0,957	2,98	3	1,69	3,8
	1	0,717	3,30	3	2,28	4,02
	1,5	0,612	3,46	3	2,54	4,47
	2	0,548	3,56	3	2,6	3,9
10	0,5	0,718	6,2	3	5,28	7,0
	1	0,514	6,9	3	5,8	7,29
	1,5	0,473	7,0	3	6,1	7,4
	2	0,426	7,2	3	6,3	7,5
20	0,5	0,717	12,6	3	11,1	12,9
	1	0,548	13,6	3	12,5	13,9
	1,5	0,474	14,0	3	12,8	14,1
	2	0,425	14,4	3	13,2	14,5
30	0,5	0,472	21,1	3	20	21,3
	1	0,369	22,2	3	21,0	21,6
	1,5	0,32	22,5	3	21,3	22,7

Из таблицы 3.4 видно, что наиболее «чувствительны» к влиянию ветра капли размером до 0,5 мм, а также капли с небольшой скоростью. Чем меньше диаметр капли, ее начальная скорость и больше скорость ветра, тем сильнее влияние силы сопротивления [29], рис. 3.23.

Так, для мелких капель до 0,5 мм время торможения попутным ветром составляет не более 0,3 с, а при встречном направлении ветра это время уменьшается в 1,5-2 раза, рис. 3.24 [29].

Для мелких капель при скорости ветра более 2 м/с возможно перемещение в отрицательном направлении оси X.

При малой скорости ветра и при попутном ветре влияние силы сопротивления незначительно, поэтому траектории движения таких капель близки к параболе, рис. 3.25.

Известно, что скорость ветра по высоте подчиняется логарифмическому закону [16]:

$$V_z = \frac{V_D}{\chi} \ln \frac{Z}{Z_0}, \quad (3.39)$$

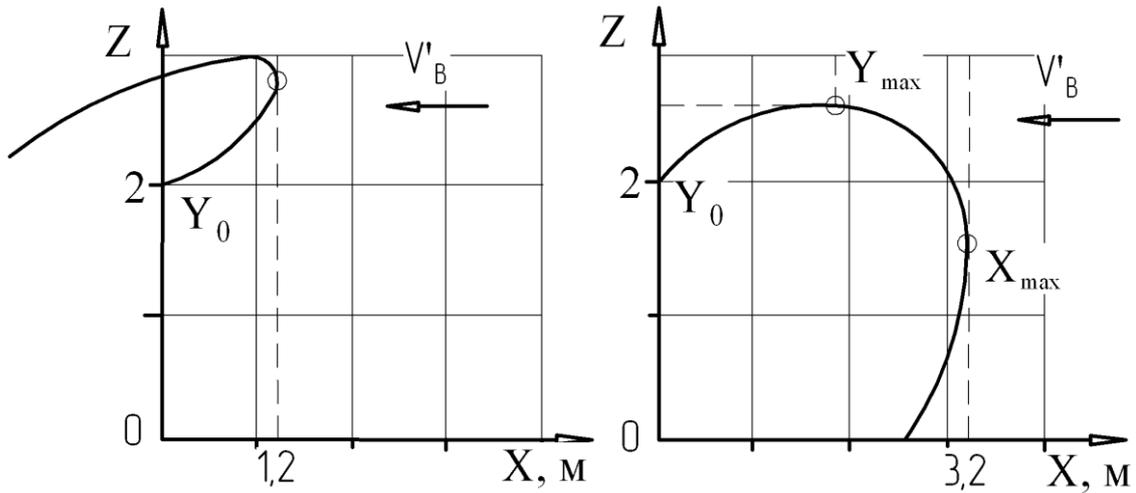


Рисунок 3.23 – Траектории движения при встречном направлении ветра для капель размерами: а) $d_K=0,3$ мм при $V_B=3$ м/с; б) $d_K=0,8$ мм при $V_B=3$ м/с

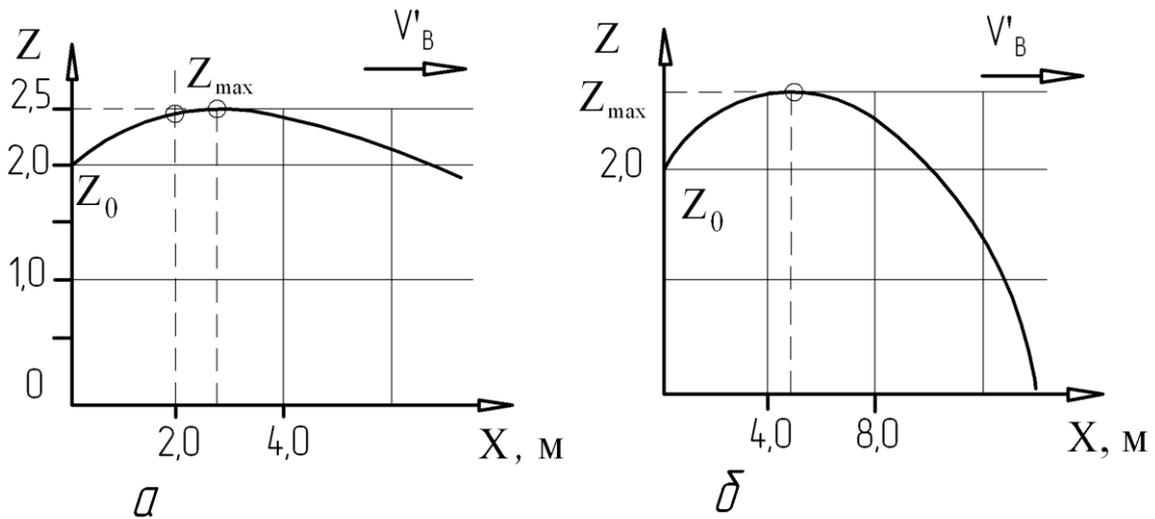


Рисунок 3.24 – Траектории движения при попутном направлении ветра для капель размерами: а) $d_K=0,3$ мм при $V_B=1,5$ м/с; б) $d_K=0,8$ мм при $V_B=1,5$ м/с

где: V_D – динамическая скорость, м/с;

χ – постоянная Кармана ($\chi=0,38$);

Z_0 – высота шероховатости (где $V_D = 0$, обычно равна 20% высоты растительного покрова, но не менее 0,03).

Согласно нормативам [67], скорость ветра при испытаниях дождевальными машин, определяется на высоте 2 м. Тогда зависимость будет иметь вид:

$$V_2 = \frac{V_D}{0,38} \ln \frac{2}{Z_0}, \quad (3.40)$$

тогда

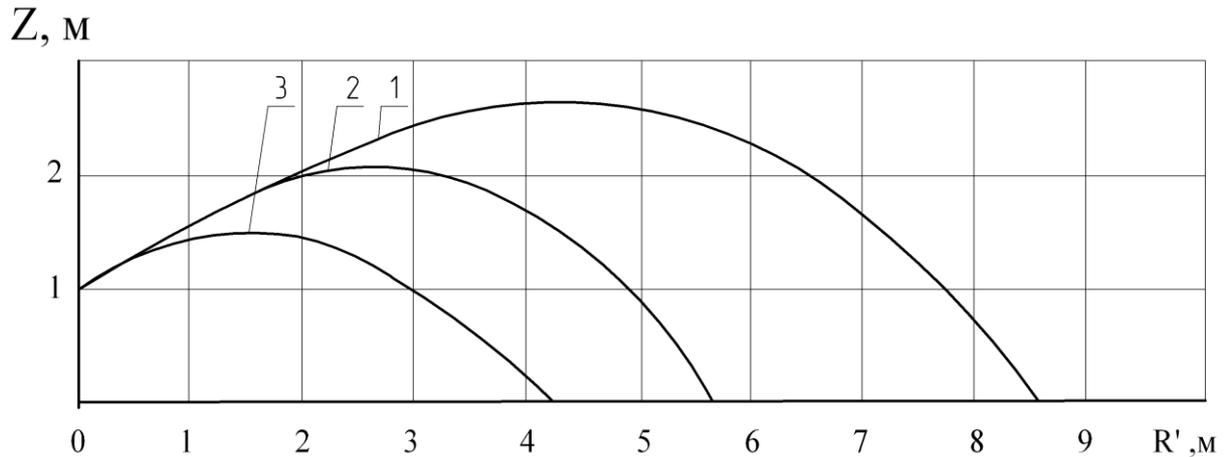


Рисунок 3.25 – Расчетные траектории движения капель при начальной скорости 15 м/с в попутном направлении ветра $V'_B = 2$ м/с; $\alpha' = 30^\circ$; 1 – $d_k = 2$ мм; 2 – $d_k = 1$ мм; 3 – $d_k = 0,5$ мм;

тогда

$$V_D = 0,38V_2 \ell n \frac{2}{Z_0}, \quad (3.41)$$

Поскольку $V'_B = V_D$,

$$R' = \frac{1}{k_C} \left(V_1 \cos \alpha' + 0,38 \cos \beta V_2 \ell n \frac{2}{Z_0} \right) (1 - e^{-tk_C}) - \left(0,38 V_2 \ell n \frac{2}{Z_0} \cos \beta \right) t. \quad (3.42)$$

Рассматривая влияние угла вылета струи на дальность полета, легко можно определить рациональный угол в зависимости от скорости ветра.

При средних значениях ветра 3-5 м/с рациональным углом вылета струи к горизонту составляют 25-35°.

Характеристики дисперсности дождевателей. Равномерность полива

Для того чтобы количественно оценить процесс распыливания (дисперсность), необходимо рассмотреть распределение капель по их диаметрам и дальности полета.

По дисперсной характеристике дождевателя можно составить функцию распределения объемов капель по диаметрам $V(d_{ki})$, разбить на отдельные интервалы Δd_{ki} :

$$V(d_{ki}) = \frac{d_{ki}^3 n_i}{\Delta d_k \sum_{i=1}^{m'} d_{ki}^3 n_i}, \quad (3.43)$$

где n_i – количество капель, размеры которых находятся в интервале $d_{ki-1} \leq d_{ki} < \Delta d_{ki+1}$;

m' – количество групп, на которые разбит весь спектр размеров капель.

Если условно длину зоны орошения разделить на j колец шириной $\Delta L = X_{j+1} - X_j$, то количество воды, попавшей в каждое кольцо в единицу времени может быть найдено расчетом траекторий капель всех интервалов размеров (рис. 3.26).

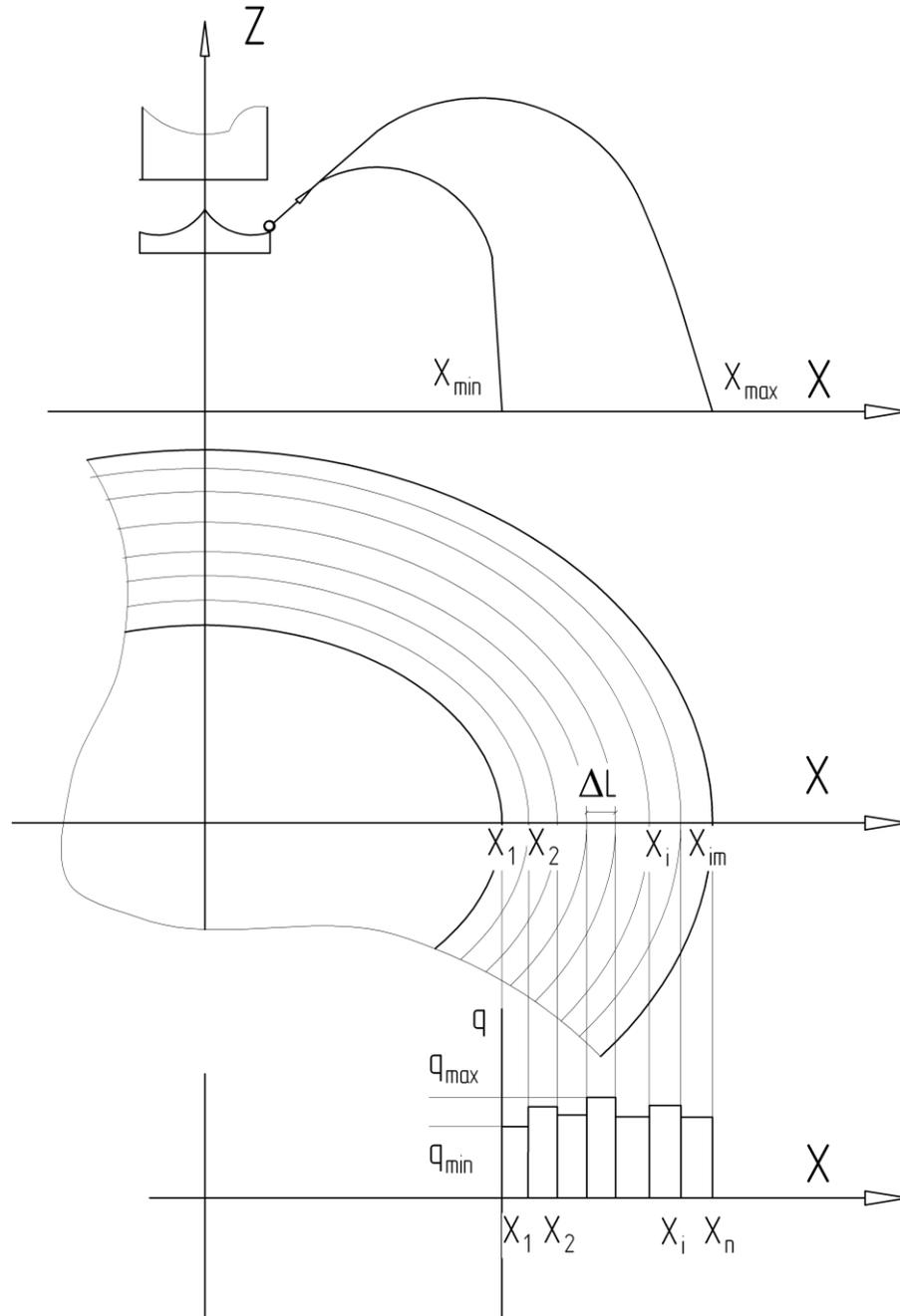


Рисунок 3.26 – Форма орошаемой площади и распределение расхода жидкости с учетом метеорологических условий

$$q_a = \sum_{i=1}^{m'} V(d_{ki}), \quad (3.44)$$

$$q_a = p_1 q_{1a} + p_2 q_{2a} + \dots + p_i q_{ia} \quad (3.45)$$

Величина p_i – вероятность частоты появления капель размера d_{ki} .

При значительном влиянии ветра форма площади орошения принимает форму эллипса. Для уменьшения вредного влияния ветра также необходимо менять угол наклона струи к горизонтальной плоскости. При направлении струи против ветра угол наклона струи должен быть меньше 30° , что согласуется с исследованиями.

Равномерность полива дождевальными машинами определяется характером взаимного перекрытия осадков от соседних дождевателей. Равномерность распределения дождя по площади полива после прохода дождевальной машины характеризуется отклонением суммарных значений слоя дождя от среднего слоя для всего участка полива. Суммарная интенсивность дождя в i -ой точке поля после прохода машины складывается из суммарной интенсивности дождя от основного дождевателя и суммарных интенсивностей от соседних дождевателей.

Агротехническими требованиями на дождевальные машины устанавливаются нижние границы равномерности полива: коэффициент эффективного полива $K_{\text{эф}} \geq 0,7$, коэффициент недостаточного полива $K_{\text{нп}} \leq 0,15$ [67].

Задача нахождения оптимальных расстояний между дождевателями состоит в нахождении области, в которой соблюдаются агротехнические требования к интенсивности и равномерности распределения дождя с учетом влияния ветра в границах разрешенной эксплуатации машины.

Важным параметром при выборе расстояния между отводами под дождеобразующие устройства является степень перекрытия ($K_{\text{п}}$) дождя. Чем больше дождь дифференцирован по интенсивности и структуре капель, тем выше должна быть степень перекрытия.

Методика, разработанная [16], рекомендует уменьшать расстояние между позициями дождевателей в зависимости от ветровых режимов.

При наличии нестабильных ветровых режимов:

$$L_{\text{д}} = 1,42\varepsilon R', \quad (3.46)$$

$L_{\text{д}}$ – расстояние между отводами под дождеобразующие устройства, м;

R' – радиус, м;

ε – коэффициент сужения.

Т.е. при увеличении напора на входе в машину расстояние между отводами под дождеобразующие устройства следует увеличивать.

Также в зависимости от типа дождевателя: ориентировочно можно отметить, что при прочих равных условиях расстояние между дождевателями с гладким дефлектором должно быть на 20-40% меньше, за счет меньшей скорости потока при сходе с дефлектора, а соответственно меньшего радиуса полива, чем дождевателей с вращающимся дефлектором.

Т.е. вращающийся дефлектор с канавками при оптимальной равномерности будет способствовать увеличению дальности разбрызгивания.

Пользуясь рекомендациями [64] рациональным расстоянием между дождевателями с гладким дефлектором является 3,5 м. Для дождевателей с вращающимся дефлектором 4-4,5 м.

*Обоснование конструкции дождевателей для ДМ кругового действия.
Требования к ним*

При обосновании конструкций дождевателей для дождевальных машин кругового действия основными требованиями было: обеспечение качественного распыла дождя в большом диапазоне расхода воды (0,1...3,8 л/с), возможность регулирования на требуемый расход воды, простота конструкции и изготовления, низкая стоимость.

Для подтверждения теоретических исследований был разработан ряд дождевателей для дождеобразующих устройств приповерхностного полива с диаметром сопла от 3 до 15 мм, диаметром дефлектора 40, 50, 60 мм.

Согласно исследованиям Н.Ф. Рыжко [60] с целью снижения вероятности засорения дефлектора мусором высота ножек дефлектора должна соответствовать условию $h_H \approx d_0$.

Низконапорные дождеватели были изготовлены следующих типов [29]:

Дождеватель Тип 1 выполненные из оцинкованной стали (рис. 3.27).

Дождеватель Тип 2 выполненные из полиамида ПА–6 (рис. 3.28).

Дождевальная насадка типа 1 содержит монтируемый на водопроводящем трубопроводе корпус с водовыпускным отверстием, в нижней части которого с помощью резьбы устанавливаются сменные сопла, регулирующие расход воды. Дефлектор выполнен в виде обращенной в сторону корпуса вогнутой чаши. Симметрично расположенные друг напротив друга стойки, выполнены плоскими для уменьшения сопротивления подачи воды.

Грузило, закрепленное в нижней части втулки исключает колебания дождевальной насадки под воздействием ветра, что повышает равномерность полива. Основной задачей было упростить конструкцию и повысить надежность работы. Полезная модель №173434.

Дождевальная насадка Тип 2 выполнена из полиамида ПА–6 .

С целью упрощения конструкции и повышения ее надежности дефлектор, стойки, выполненные обтекаемыми, в горизонтальной плоскости и кольцевая пластина изготовлены единой деталью из пластмассы.

Для снижения себестоимости и увеличения массы грузило может быть выполнено металлическим или из влагостойкого бетона или полимербетона. Полезная модель 173433.

Ножки дождевателя должны плавно обтекаться потоком воды, поэтому поперечное сечение ножки представляет собой форму линзы, либо для металлических – из тонкого листа.

Исполнения дождевателей, выполненные для проведения исследований:

1 – с гладким статическим дефлектором;

2 – со статическим дефлектором с канавками треугольной формы (шириной от 1,5 до 5 мм);

3 – со статическим дефлектором с канавками полукруглой формы (менялась ширина канавок от 2 до 5 мм и глубина от 2 до 6 мм);

4 – с вращающимся дефлекторами треугольными канавками (ширина канавок менялась от 1,5 до 5 мм и глубина от 2 до 6 мм);

5 – с вращающимся дефлекторами полукруглыми канавками (ширина канавок от 2 до 5 мм и глубина от 2 до 6 мм);

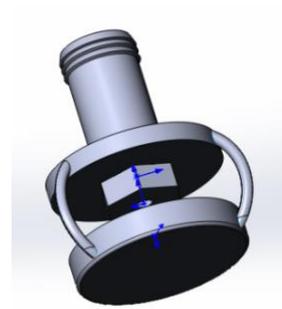
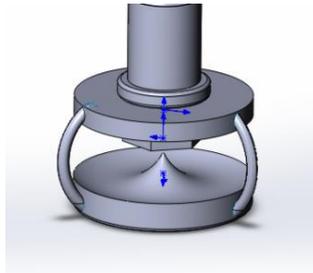
6 – каскадный (менялись диаметры отверстий в конусах и расстояния между конусами).



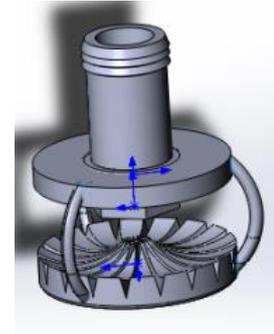
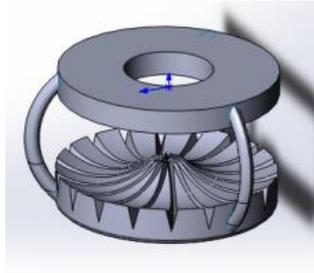
Рисунок 3.27 – Дождеватель из оцинкованной стали типа 1, сменные дефлекторы разной геометрии [29]



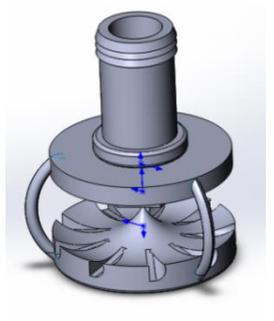
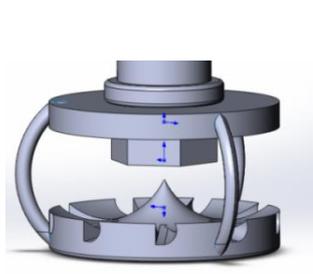
Рисунок 3.28 – Дождеватель из полиамида ПА-6 -Тип 2. Исполнение 1. Общий вид насадки [29]



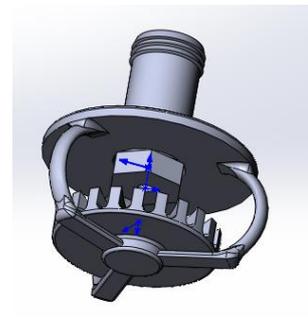
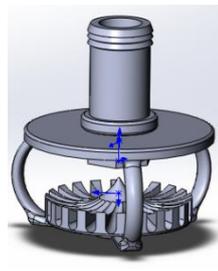
Исполнение 1



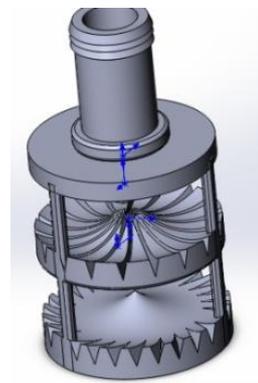
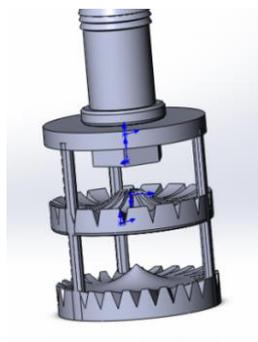
Исполнение 2



Исполнение 3



Исполнение 4-5



Исполнение 6

Рисунок 3.29 – Исполнение дождевателей

3.4 Теоретические основы проектирования водопроводящего трубопровода ДМ кругового действия

Совершенствование конструкции дождевальной машины напрямую связано с оптимизацией водопроводящего пояса, тщательно подобранные параметры которого позволят значительно уменьшить материалоемкость и стоимость самой машины, повысить эффективность работы, оптимизировать режимы полива, снизить интенсивность водоподачи.

Основные факторы, влияющие на выбор параметров водопроводящего пояса можно разделить на две основные категории: природные и хозяйственные (рис. 3.30) [29].



Рисунок 3.30 – Критерии оптимизации водопроводящего пояса

Природные факторы включают четыре основные подгруппы: климатические особенности местности, тип и физико-механические свойства почвы, выращиваемые культуры и рельеф местности. Эти подгруппы являются определяющими при задании основного показателя-нормы полива или слоя осадков. Важнейшим показателем будет являться расход, соответственно, диаметр водопроводящего пояса или ряд диаметров от основной опоры к концевому аппарату.

Хозяйственные (производственные) факторы: существующая оросительная система, если таковая имеется (гидранты, имеющаяся насосная станция), определяющая напор на входе в машину; размеры и форма поля, задающие длину машины. Принципиально хозяйственные факторы отличаются от природных тем, что их можно при необходимости видоизменять в процессе хозяйственной деятельности, что однако требует финансовых и трудовых затрат.

Критериями оптимизации водопроводящего пояса машины являются: диаметр трубопровода, длина и диаметр секций трубопровода при его переменном сечении, расстояния между водоотводами дождеобразующих устройств и площадь сечения сопла дождевателя, влияющие на выбор конструкции и параметров самого дождевателей.

Значительная металлоемкость, высокая стоимость конструкции широкозахватной дождевальной техники не позволяет проводить необходимые полноценные натурные и лабораторные исследования в полном объеме, и математическое моделирование является основным экономически целесообразным методом проектирования [23, 24, 25].

Применение математического моделирования позволяет усовершенствовать конструкцию, уменьшить металлоемкость и стоимость, оптимизировать параметры, дает значительную экономию материальных и трудовых ресурсов.

Движение жидкости с изменением массы вдоль пути впервые рассмотрено в работах Хайндса [80] и Фавра [78]. В последствии идеи Хайндса и Фавра детализированы в работах [79, 81] применительно к гидравлическому расчету поливных трубопроводов капельного орошения. Однако все указанные авторы при определении потерь напора по длине использовали формулу Хазена - Вильямса [79], которая дает значительные погрешности в расчетах при непрерывном отборе жидкости.

Рассмотрим гидравлический расчет напорного трубопровода при заданном неравномерном отборе расхода при расчете водопроводящего пояса дождевальной машины кругового действия.

При решении данной задачи традиционно используется модель непрерывного отбора расхода [80] по линейному закону:

$$Q_2 = Q_L \frac{s}{L_M}, \quad (3.47)$$

где Q_2 – отбираемый расход;

Q_L, L_M – расход в последнем отводе (максимальный расход) и физическая длина дождевальной машины, соответственно;

s – текущее значение полярного радиуса.

Следуя И.М. Коновалову [47, 52, 72], в этом случае можно получить сравнительно простое дифференциальное уравнение установившегося движения воды с переменной массой в трубопроводе постоянного сечения при наличии отбираемого расхода:

$$\frac{a_0''(a_2 - 2)Q}{g\omega^2} \cdot \frac{dQ_2}{ds} + \frac{dH}{ds} + \frac{Q^2}{K^2} = 0, \quad (3.48)$$

где a_0'' – коэффициент Буссинеска;

a_2 – коэффициент отсоединения расхода;

Q, K – расход и модуль расхода в произвольном сечении потока, соответственно;

H – гидродинамический напор;

g – ускорение свободного падения;

ω – площадь живого сечения потока.

Интегрирование уравнения (3.48) с условием (3.47) в полярных координатах дает уравнение пьезометрической линии для трубопровода машины кругового действия [72]:

$$H = -L_M \frac{\bar{s}}{K^2} \left(1 - \frac{2}{3}\bar{s}^2 + \frac{1}{5}\bar{s}^4 \right) Q_M^2 + a_0'' \frac{a_2 - 2}{2g\omega^2} \bar{s}^2 (2 - \bar{s}^2) Q_M^2, \quad (3.49)$$

где $\bar{s} = s/L_M$ – относительная координата;

Q_M – расход ДМ.

Из (3.49) следует, что полная потеря напора по длине трубопровода составляет:

$$H_{\text{полн}} = \left(\frac{8}{15} \frac{L_M}{K^2} - a_0'' \frac{a_2 - 2}{2g\omega^2} \right) Q_M^2. \quad (3.50)$$

Основным недостатком решения (3.49), (3.50) являются предположения о том, что:

1) модуль расхода K и коэффициент отсоединения расхода a_2 не зависят от координаты s ;

2) отбор расхода Q_2 по длине трубопровода происходит непрерывно; в то время как в действительности модуль расхода K и коэффициент отсоединения расхода a_2 изменяются по длине трубопровода, а отбор расхода Q_2 происходит дискретно [78, 80].

В работе А.А. Федорца [72] этот недостаток частично устраняется введением в формулу (3.50) множителем эмпирического параметра дискретности K_d , который зависит от частоты размещения отводов $\gamma' = L_{OT}/L_M$, где L_{OT} – расстояние между отводами. В результате автором предложена эмпирическая зависимость:

$$K_d = 1 + 1,7\gamma'^{1,04}. \quad (3.51)$$

Коэффициент отсоединения расхода a_2 из физических соображений находится в интервале $0 \leq a_2 < 1$. А.А. Федорцом [72] для коэффициента a_2 получена эмпирическая формула

$$a_2 = \frac{0,00112 \cdot Re^{0,6422}}{e^{0,11 \cdot Re \cdot 10^{-4}}}, \quad (3.52)$$

где Re – число Рейнольдса, определяемое по диаметру трубопровода и полному расходу Q_M .

Математическая модель (3.49)-(3.52), полученная на основе дифференциального уравнения установившегося движения воды с переменной массой, дает достаточно хорошее совпадение с экспериментами в работах А.А. Федорца [72]. Однако область применения этой модели ограничивается применением эмпирических зависимостей для коэффициентов дискретности K_d и отсоединения расхода a_2 , полученных для конкретных условий эксперимента. В теоретических исследованиях А.А. Федорца не учитывается также материал труб. Ниже показано, как можно построить модель дискретного отбора воды непосредственно из гидравлических представлений, не используя дифференциальные уравнения.

Предположим, что дождевальная машина кругового действия должна обеспечить выдачу поливной нормы m_{Π} согласно Б.П. Фокину и А.К. Носову [73], $m^3/\text{га}$:

$$\frac{m_{\Pi}}{10} \equiv h_{oc}, \quad (3.53)$$

h_{oc} – слой осадков, мм.

При равномерном распределении отводов по длине трубопровода на расстоянии $L_{от}$ друг от друга расчетная площадь орошения составит:

$$S_0 = \pi \left(L_M^2 - \frac{L_{от}^2}{4} \right) \cdot 10^{-4}, \text{ га}, \quad (3.54)$$

а необходимый расход дождевальной машины по Б.П. Фокину и А.К. Носову [73] может быть описан выражением:

$$Q_M = \frac{25h_{oc}}{9 \cdot 24T_0} S_0, \text{ л/с}, \quad (3.55)$$

где T_0 – время работы дождевальной машины, сут.

Количество отводов на трубопроводе, который в общем случае может быть переменного сечения, определяется как:

$$N = \text{INT} \left(\frac{L_M}{L_{от}} \right). \quad (3.56)$$

Каждый из отводов должен обеспечивать выдачу поливной нормы h_{oc} для соответствующего поливаемого кольца площадью

$$S_i = 2\pi L_{от}^2 i, \text{ м}^2; \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (3.57)$$

Тогда расход каждого отвода должен составлять:

$$Q_i = \frac{h_{oc}}{24 \cdot 3600T_0} S_i, \text{ л/с} \quad (3.58)$$

Соответственно, для расходов по участкам между отводами имеем:

$$\left. \begin{aligned} Q_{\text{ТР}}^{(1)} &= Q_0; \\ Q_{\text{ТР}}^{(i)} &= Q_{\text{ТР}}^{(i-1)} - Q_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (3.59)$$

Зная внутренний диаметр $d_{\text{ВН}}$ трубопровода, можно найти средние скорости движения воды на каждом участке трубопровода:

$$V_i = Q_{\text{ТР}}^{(i)} / \omega / 1000, \text{ м/с}, \quad (3.60)$$

где $\omega = \pi d_{\text{ВН}}^2 / 4$.

Заметим, что из экономических соображений средние скорости на участках трубопровода не должны превышать 3 м/с [78].

Согласно исследованиям А.А. Федорца [72] при выполнении условия

$$\frac{L_{\text{ОТ}}}{d_{\text{ВН}}}, \frac{d_{\text{ВН}}}{d_{\text{ВН}}^{\text{ОТБ}}} > 7 - 10, \quad (3.61)$$

где $d_{\text{ВН}}^{\text{ОТБ}}$ – внутренний диаметр отвода, потерями напора на «смешение масс» и перепадом восстановления напора [52] можно пренебречь и вычислять потери напора между отводами по формулам равномерного движения.

Для определения потерь напора на участках трубопровода между отводами воспользуемся апробированной методикой расчета потерь напора по длине потока для новых стальных труб Ф.А. Шевелева [75]:

$$\left. \begin{aligned} h_1^{(i)} &= \theta_i A Q_i^2 L_{\text{ОТ}}; \quad A = \frac{0,001478}{d^{5,226}}; \\ \theta_i &= 0,889 \left(1 + \frac{0,684}{V_i} \right)^{0,226}; \quad i = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \right\} \quad (3.62)$$

Местные потери напора в трубопроводе учтем добавкой 5% от потерь напора по длине, что согласуется с данными А.А. Федорца [72]:

$$h_{\text{ТР}}^{(i)} = 1,05 h_1^{(i)}. \quad (3.63)$$

Тогда суммарные потери напора в трубопроводе составят:

$$h_{\text{ТР}} = \sum_{i=1}^N h_{\text{ТР}}^{(i)}. \quad (3.64)$$

Зная геодезический напор и задавая свободный напор на последнем отводе, можно определить потребный напор на гидранте дождевальная машины. Алгоритм вычислений (3.53) - (3.64) легко реализуется на любом алгоритмическом языке [24], приложение 1.

Ниже рассмотрен пример моделирования работы водопроводящего пояса дождевальная машины по следующим исходным данным: длина трубопровода диаметром $d = 159$ мм составляет $L_{\text{М}} = 500$ м; расстояние между отводами $L_{\text{ОТ}} =$

1,45 м; поливная норма $h_{OC} = 40$ мм; время работы $T_0 = 7$ суток; геодезический напор (высота дождевальной машины) $H_r = 4,5$ м; напор на излив на последнем отводе 1 м.

В результате расчета по модели (3.53) - (3.62) получено: количество отводов 344; фактическая поливаемая площадь 78,39 га; необходимый расход дождевальной машины $Q_M = 51,84$ л/с; скорость движения последней опорной тележки $V_{CP} = 0,31$ м/мин. Другие результаты расчетов представлены в таблице 3.5 и на рис. 3.31 – 3.32.

Суммарные потери напора в водопроводящем тракте составляют $\Sigma h_{TP} = 19,16$ м, а потребный напор на гидранте дождевальной машины $H_{потр} = 24,66$ м.

Расчет по модели непрерывного распределения расхода (3.50) - (3.52) дает суммарные потери напора $\Sigma h_{TP} = 18,88$ м, т.е. расхождение составляет 1,5% [29].

Таблица 3.5 – Характеристики потока

№ отвода (участка)	Q(i), л/с	Q _{TP} (i), л/с	V(i), м/с	H(i), м
0(гидрант)	0,000	51,84	2,83	24,66
24	0,021	51,60	2,81	22,15
44	0,038	51,02	2,78	20,13
64	0,056	50,08	2,72	18,17
84	0,073	48,80	2,65	16,29
104	0,091	47,17	2,57	14,52
124	0,108	45,18	2,46	12,88
144	0,126	42,85	2,33	11,39
164	0,143	40,17	2,18	10,05
184	0,161	37,14	2,02	8,90
204	0,178	33,76	1,836	7,92
224	0,196	30,02	1,63	7,12
244	0,213	25,94	1,41	6,50
264	0,231	21,51	1,17	6,05
284	0,248	16,74	0,91	5,75
304	0,266	11,61	0,63	5,58
324	0,283	6,13	0,33	5,51
344	0,301	0,301	0,0163	5,50

На основе математической модели (3.53) - (3.62) реализован также расчет водопроводящего пояса дождевальной машины переменного диаметра, с тупиковым и параллельным отводом, консолью, с концевым дождевальным аппаратом.

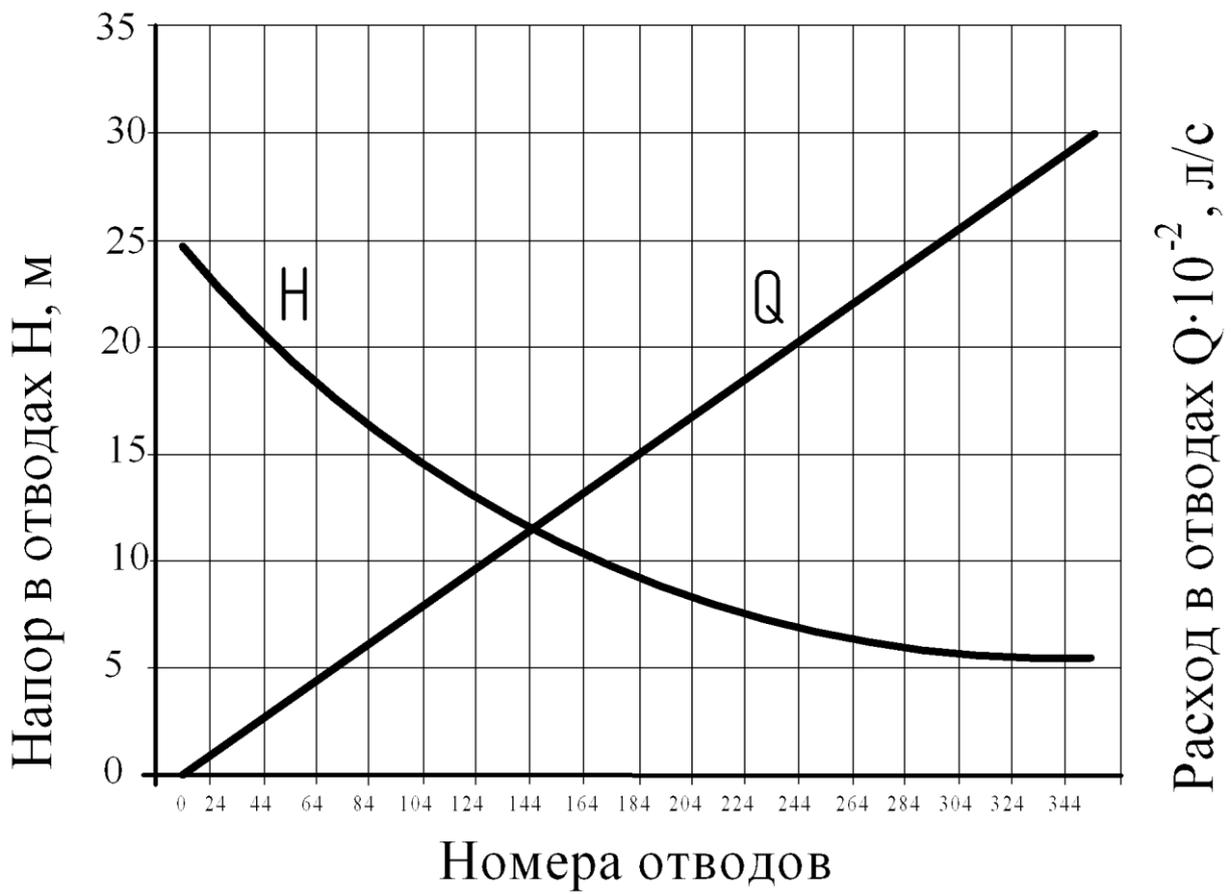


Рисунок 3.31 – Напор и расход в отводах трубопровода

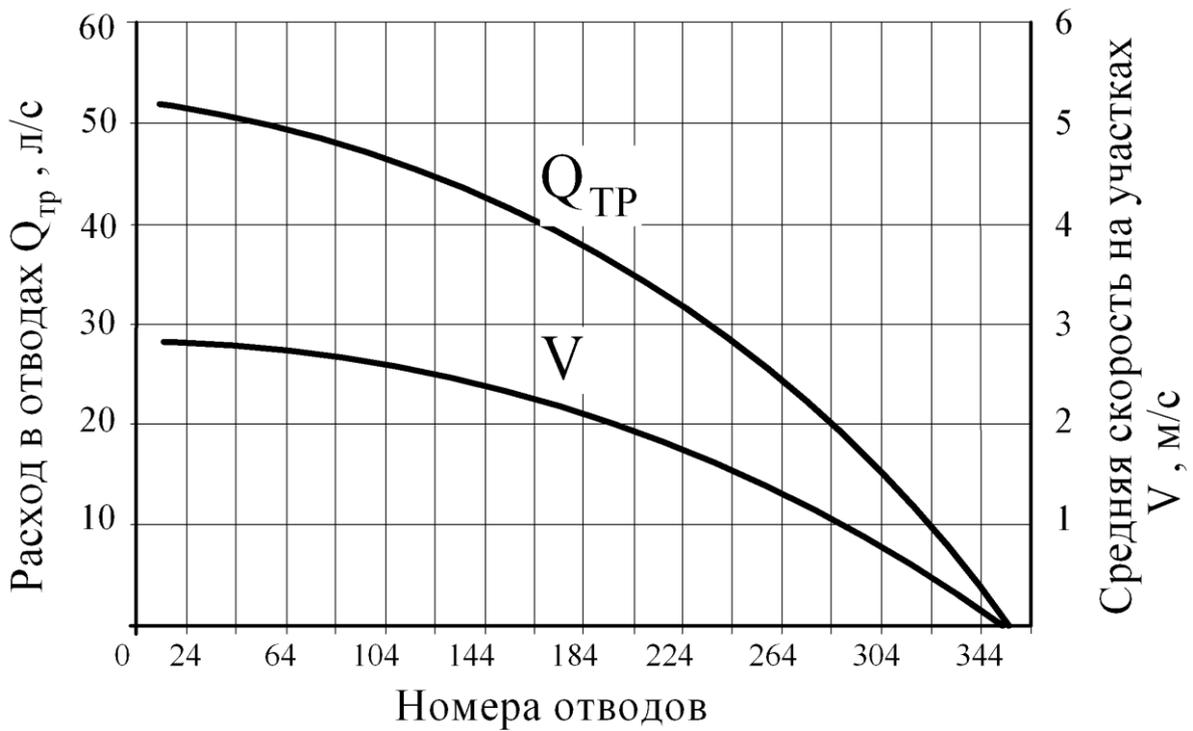


Рисунок 3.32 – Расход и средняя скорость на участках трубопровода

На основе представленной методики был спроектирован номенклатурный ряд дождеобразующих устройств и реализован на примере широкозахватной дождевальная машины кругового действия «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) (ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ – ООО «Мелиоративные машины» [24, 26, 29].

3.5 Снижение материальных ресурсов при проектировании широкозахватных ДМ кругового действия

Оптимизация длины пролета и конструктивно-высотных свойств

Одним из путей экономии материальных ресурсов является оптимизация конструкций дождевальных машин, которая проявляется в снижении их металлоемкости [1, 15, 29].

Рассмотрим металлоемкость дождевальных машин, т/га, как отношение:

$$M = \sum m_M / S_0; \quad (3.65)$$

где $\sum m_M$ – масса машины, т;

S_0 – площадь полива, га.

Общая масса машины складывается из составляющих масс основной опоры $m_{оп}$, масс опорных тележек m_T , масс участков водопроводящего трубопровода между опорными тележками с системой крепления (шпренгельной системой) $m_{ВТ}$ и массы консоли (при наличии) m_K .

$$\sum m_M = m_{оп} + n_T m_T + m_{ВТ} + m_K, \quad (3.66)$$

где n_T – количество тележек.

Количество опорных тележек можно выразить как

$$n_T = \text{INT} \left(\frac{L_M - \ell_{КОН}}{\ell_{ПР}} \right), \quad (3.67)$$

L_M – длина машины;

$\ell_{КОН}$ – длина консоли;

$\ell_{ПР}$ – расстояние между пролетами.

Массу водопроводящего трубопровода с системой крепления можно выразить как:

$$m_{ВТ} = m_{1ВТ} (L_M - \ell_{КОН}), \quad (3.68)$$

$m_{1ВТ}$ – масса метра водопроводящего трубопровода с средней массой, приходящихся на него систем шпренгелей и креплений

$$\sum m_M = m_{оп} + \left(\frac{L_M - \ell_{КОН}}{\ell_{ПР}} \right) m_T + m_{1ВТ} L_M + m_K, \quad (3.69)$$

Т.о. очевидными путями снижения металлоемкости машины являются:

1. Увеличением пролетов между тележками (уменьшение количество тележек);

2. Уменьшением массы водопроводящего трубопровода за счет оптимизации шпренгельных систем и применения трубопровода с переменным диаметром труб по длине машины.

Рассмотрим отдельно водопроводящий трубопровод машины, его диаметр, соотношение длин пролетов и общую длину машины для ДМ типа «Фрегат» и ДМ «Кубань».

ДМ «Фрегат» изготавливается в двух исполнениях: «Фрегат-1» – машины марки ДМУ-А и «Фрегат-2» – машины марки ДМУ-Б.

ДМУ-А – машины, водопроводящий трубопровод которых состоит из труб Ø 152,4 мм. Для работы на полях с повышенными местными уклонами на трубопроводе этих машин могут быть установлены гибкие вставки; ДМУ-Б - машины, водопроводящий трубопровод которых состоит из труб Ø 177,8 и 152,4 мм. Гибкие вставки на трубопроводе не устанавливаются [16].

Номенклатурный ряд ДМ «Кубань-ЛК1» представлен на рис. 3.33. Для ДМ с максимальной длиной диаметр труб по длине машины изменяется от основной опоры как 203 мм, 168 мм и консоль 152,4 мм и 102 мм.

Металлоемкость ДМ типа «Кубань ЛК1» значительно выше ДМ типа «Фрегат» и явно требует детального анализа и оптимизации конструкции.

Снижение массы машин «Кубань-ЛК1М» с пролетами 48,7 м в сравнении с классическим исполнением «Кубань-ЛК1» объясняется снижением массы трубопровода за счет уменьшения диаметра труб до 159 мм представленного модельного ряда.

На основании анализа металлоемкости были построены графики, рис. 3.34-3.35. При увеличении площади полива, охватываемой одной дождевальнoй машиной, металлоемкость снижается, поскольку достаточно значительная масса приходится на основную опору, присутствующую в любой машине независимо от длины, а соответственно площади захвата. Также хорошо заметно снижение металлоемкости при увеличении длины пролетов с 48,7 до 59,5 м и 65,25 м.

Определим ряд показателей и коэффициентов, по которым возможно будет оценить и сравнить различные конструкции и модификации между собой по материалоемкости.

Установим конструктивный коэффициент массы машин [1, 15], т.е. отношение общей массы к массе водопроводящего пояса. Конструктивный коэффициент имеет незначительные колебания между модификациями по максимуму и минимуму и составляет для ДМ «Фрегат» от 4,13 до 4,62 и для ДМ типа «Кубань» 3,17 до 3,97.

Поэтому для каждого типа машин можно принять их средние значения.

Также анализ показывает следующее:

1. Конструктивный коэффициент массы у машин с переменным диаметром водопроводящего трубопровода при прочих равных условиях ("Фрегат-ДМ", "Фрегат-ДМУБ") значительно ниже, чем у машин с постоянным диаметром трубопровода ("Фрегат-ДМУА").

2. Конструктивный коэффициент у машин с жесткой фермой ("Кубань-ЛК1", «Кубань-ЛК1М (КАСКАД)») несколько ниже, чем у машин с вантовой подвеской фермы "Фрегат", что говорит о перспективности данного направления.

3. Общая масса ДМ «КАСКАД» с системой пролетов 59,5 и 65,2м снижена по сравнению с ДМ «Кубань-ЛК1» за счет конструктивно иного исполнения фермы, шпренгельной системы подвески и креплений, а также диаметра и толщины трубопровода.

4. Увеличение пролетов с 48,7м до 59,5 и 65,25 м, а соответственно уменьшение количества опорных тележек, приводов также способствует снижению общей массы машины.

Схема расположения ферм модификаций машины с консолью ЭФ-20.0

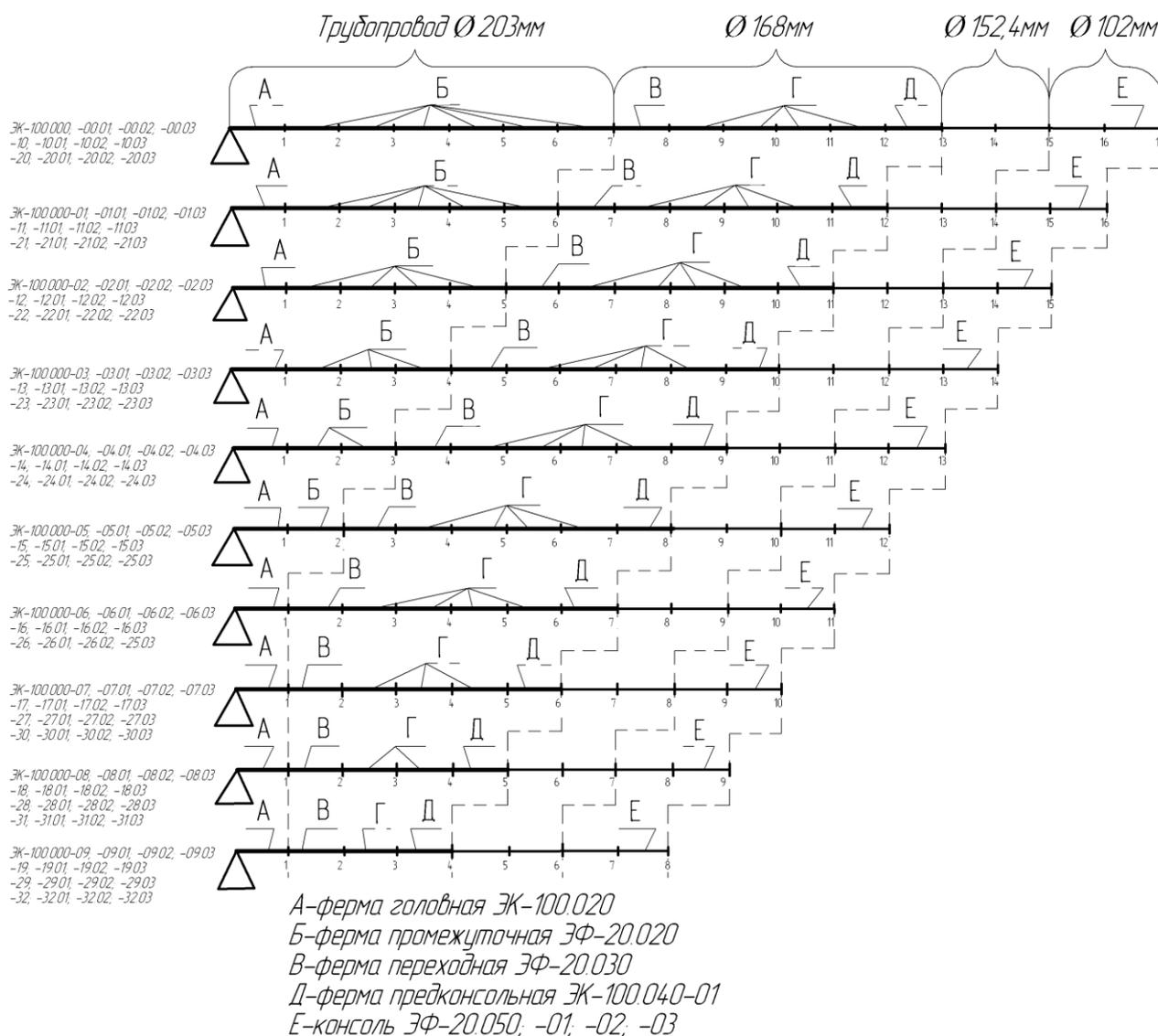


Рисунок 3.33 – Модельный ряд ДМ «Кубань-ЛК1»

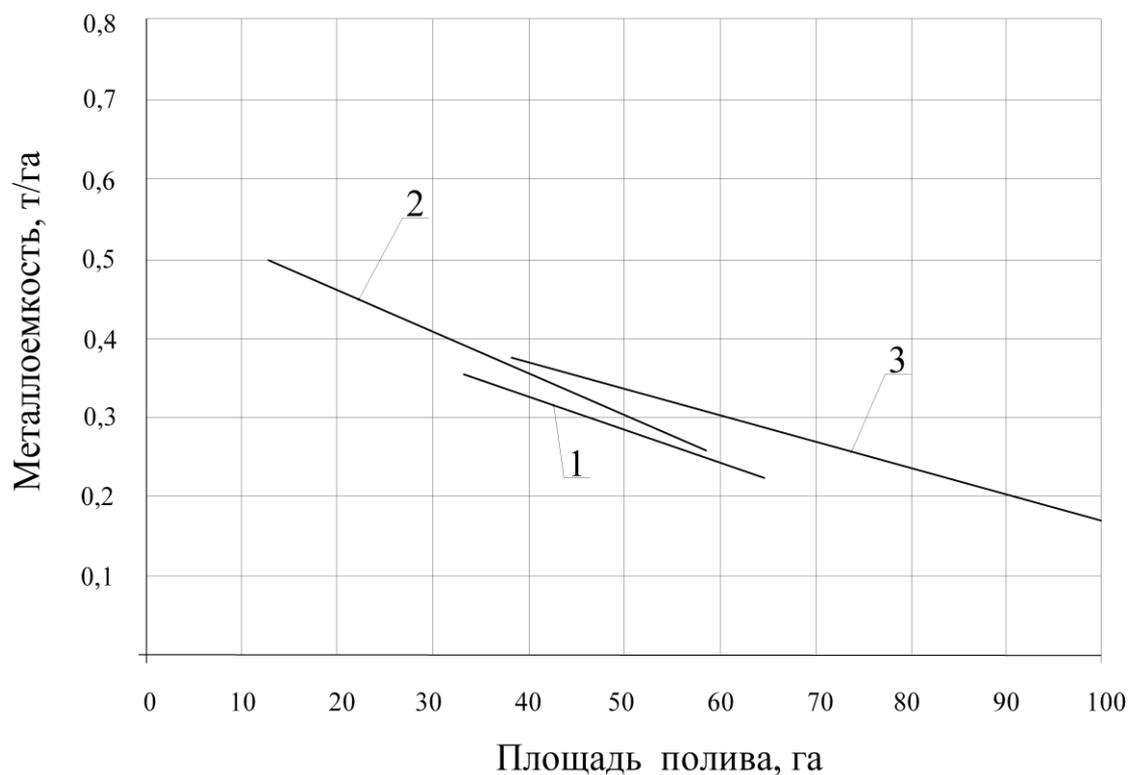


Рисунок 3.34 – Зависимость металлоемкости от площади полива:
 1 – «Фрегат-ДМУ-Б»; 2 – «Фрегат-ДМ»; 3 – «Фрегат-ДМУ-А»

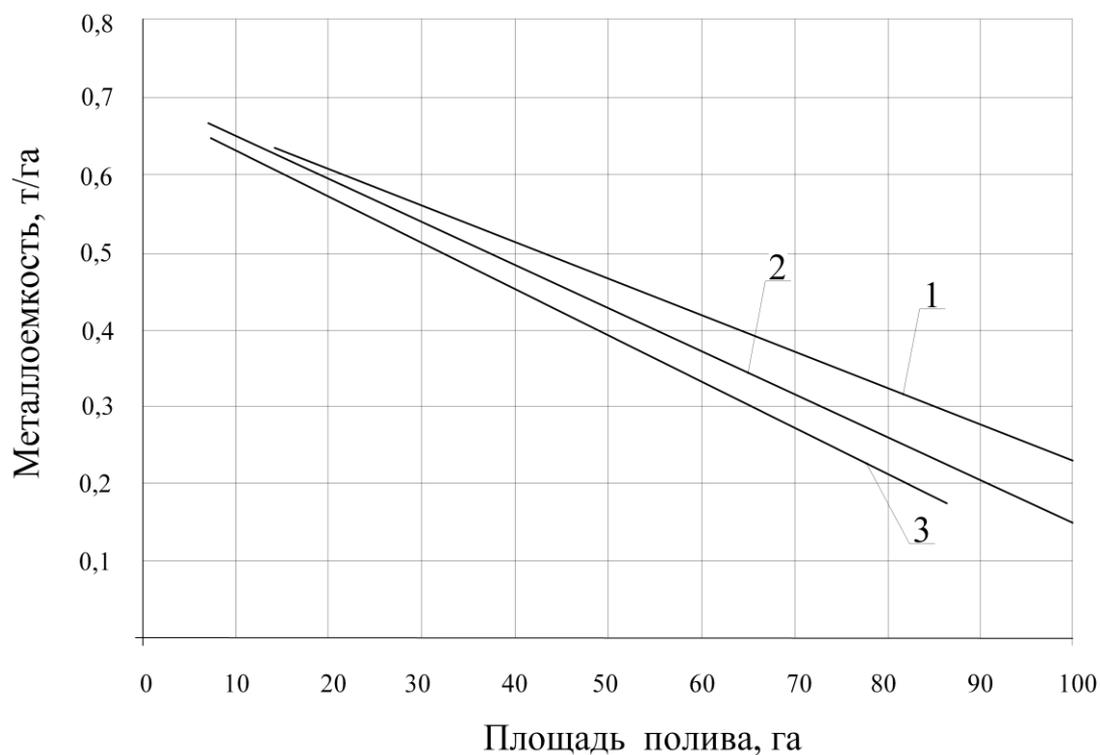


Рисунок 3.35 – Зависимость металлоемкости от площади полива
 1 – «Кубань-ЛК1»; 2 – «КАСКАД» (59,5 м); 3 – ДМ «КАСКАД» (65,2 м).

Зависимость массы машины от ее длины для различных модификаций с разными длинами пролетов представлена на рисунках 3.36-3.37. Из рисунков видно, что увеличение длины пролетов способствует снижению массы, а значит и стоимости машины в целом, что особенно видно на примере ДМ «Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М» и «КАСКАД».

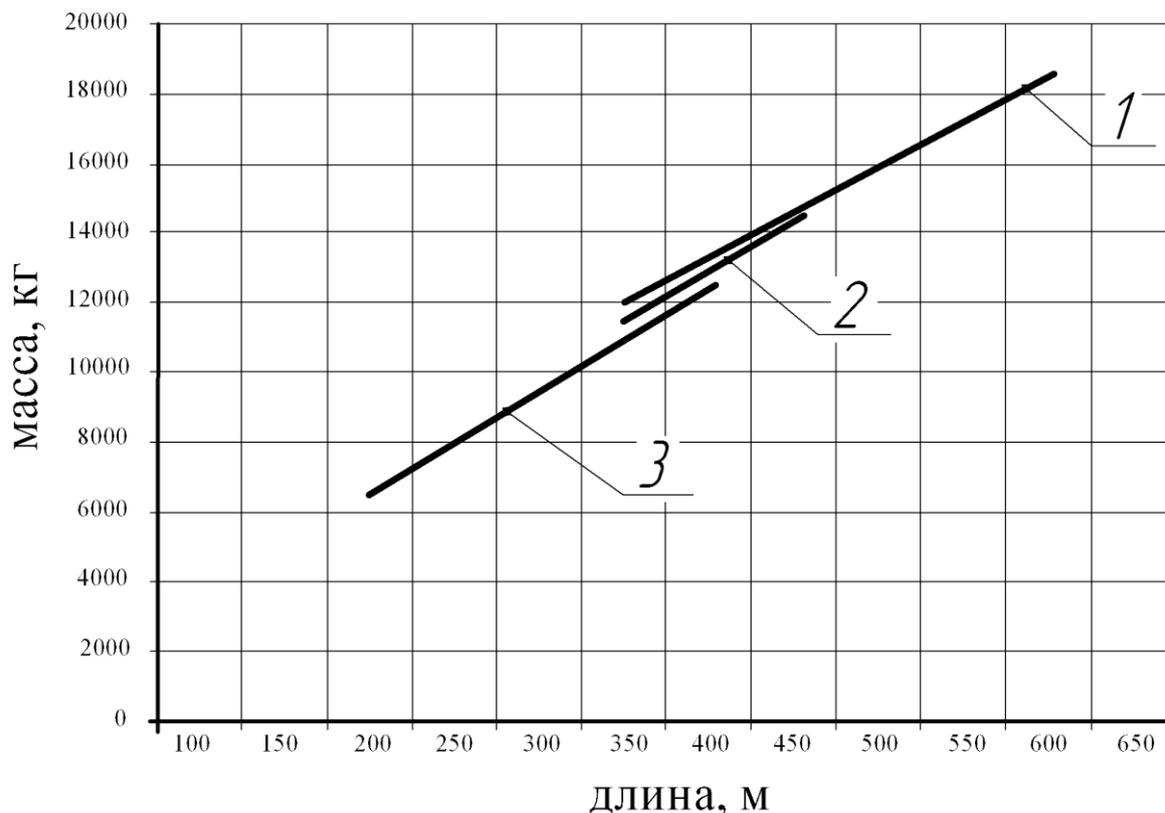


Рисунок 3.36 – Зависимость массы машины «Фрегат» от длины:
1 – «Фрегат»-ДМУ Б; 2 – ДМ «Фрегат»; 3 – «Фрегат»-ДМУ А.

Тем не менее длина пролетов ограничивается следующими факторами: прочностью системы, массой, оказывающей влияние на глубину колеи и условиями эксплуатации, т.е. рельефом, характеристиками почв. При значительных неровностях поверхности поля следует уменьшать длину пролетов и увеличивать количество опорных тележек.

Оптимизация ферменной конструкции водопроводящего пояса

Рассмотрим снижение металлоемкости ферменной конструкции водопроводящего пояса ДМ.

В результате прочностного расчета были получены сечения элементов ферм, массы панелей и всей фермы.

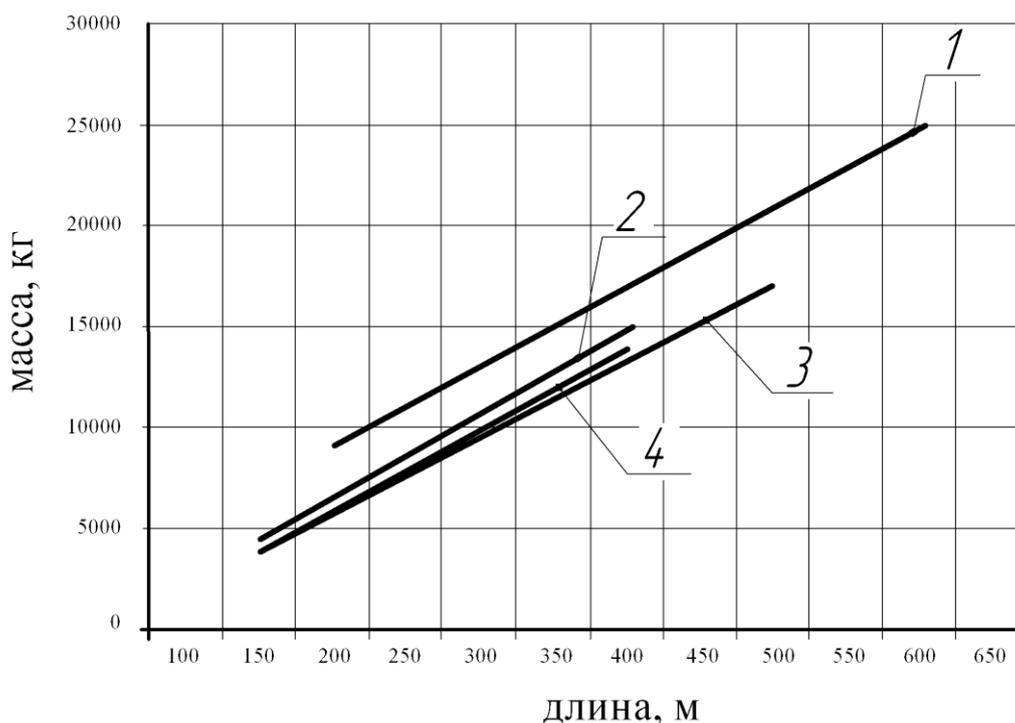


Рисунок 3.37 – Зависимость массы машины «Кубань» и «КАСКАД» от длины: 1 – «Кубань-ЛК1» (пролет 48,7м); 2 – МДЭК «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) (пролет 48,7м); 3 – ДМ «КАСКАД» (пролет 59,5 м); 4 – ДМ «КАСКАД» (пролет 65,25 м);

Важным показателем ферм является металлоемкость (в кг/м), т.к. она позволяет сравнивать равные конструкции ферм и выбирать из них наиболее экономичные.

Ферма в известной мере диктует требования к основной опоре и опорным тележкам, так как от массы ее зависит удельное давление на грунт, проходимость, устойчивость на опрокидывание. Масса фермы зависит от типа поперечного сечения, числа и размеров элементов (угольников).

В настоящее время для ДМ типа «Кубань» и «КАСКАД» используются два типа ферм (креплений, системы шпренгелей и угольников).

Ферма типа 1, применяемая на ДМ «Кубань-ЛК1» и «Кубань-ЛК1М» с пролетами 48,7 м в поперечном сечении имеет равнобедренный треугольник с разными длинами стоек и раскосов (рис. 3.38) [29].

Ферма 2 типа, усовершенствованный вариант, установлена на ДМ «КАСКАД» с пролетами 59,5 м и ДМ «КАСКАД» с пролетами 65,2 м в поперечном сечении также представляет собой равнобедренный треугольник с равновеликими тягами и раскосами и креплением в одной точке (рис. 3.39) [29].

Введем показатель, характеризующий совершенство системы ферменного пояса – коэффициент металлоемкости фермы, как отношение общего периметра угольников на пролет к длине пролета:

$$K_{\Phi\Pi} = \frac{\sum P_{\text{уг}}}{l_{\text{пр}}}, \quad (3.70)$$

где $\sum P_{\text{уг}}$ – общий периметр угольников на пролет, м;
 $l_{\text{пр}}$ – длина пролета, м .

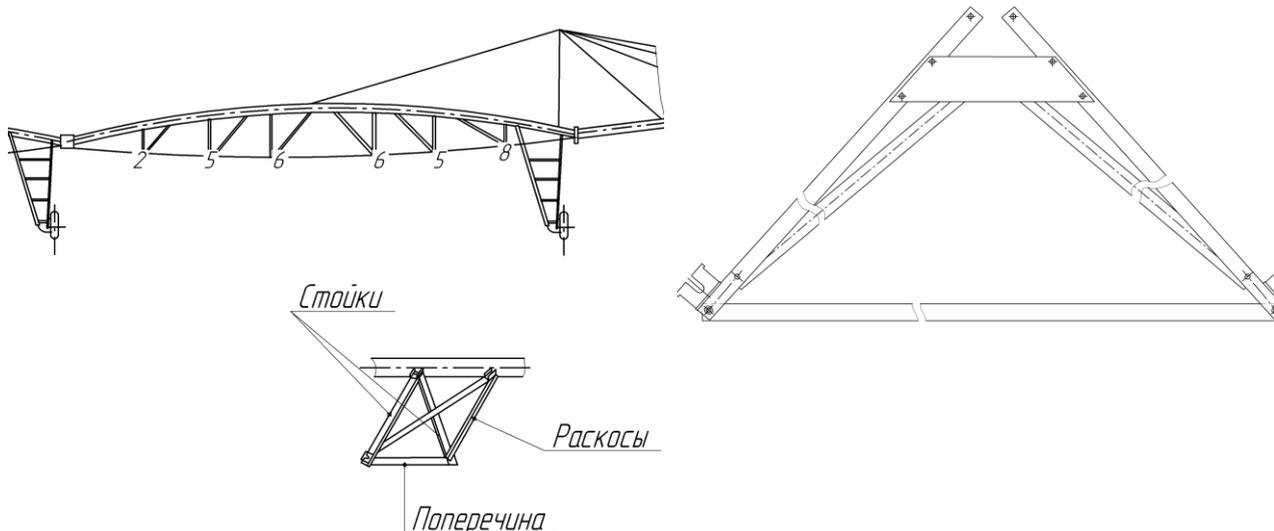


Рисунок 3.38 – Ферменная конструкция «Кубань-ЛК-1М» с длиной пролета 48,7м

Общий периметр угольников на пролет $\sum P$ для «Кубань-ЛК1» и «Кубань – ЛК1М» с пролетом 48,7м:

$$\sum P = P_2 + 2P_5 + 2P_6 + P_8 = 58,79 \text{ м}$$

P_2, P_5, P_6, P_8 – периметры соответственно угольников 2, 5, 6, 8.

$$K_{\Phi\Pi} = \frac{58,79}{48,7} = 1,2.$$

ДМ – «КАСКАД»: (пролет 59,5м)

$$\sum P = 2P_1 + 2P_2 + 2P_3 + P_4 = 62,24 \text{ м}$$

P_1, P_2, P_3, P_4 – периметры соответственно угольников 1, 2, 3, 4.

ДМ – «КАСКАД»: (пролет 65,2м)

$$\sum P = 2P_1 + 2P_2 + 2P_3 + 2P_4 = 67,72 \text{ м}$$

P_1, P_2, P_3, P_4 – периметры соответственно угольников 1, 2, 3, 4.

Т.о. для ДМ «КАСКАД» с пролетами 59,5 м и ДМ «КАСКАД» с длиной пролетов 65,2 м: $K_{ФП} = 1,04$.



Рисунок 3.39 – Ферменная конструкция ДМ «КАСКАД» с длиной пролета 59,5 м

Введем показатель, характеризующий массу угольников ферменного пояса – коэффициент массы угольников, как отношение общей массы угольников на пролет к длине пролета:

$$K_{у\Gamma} = \frac{\sum m_{у\Gamma}}{\ell_{ПР}}, \quad (3.71)$$

где $\sum m_{у\Gamma}$ – общая масса угольников на пролет, м;

$\ell_{ПР}$ – длина пролета, м.

Результаты расчетов сведены в таблицу 3.6.

Оптимизация ферменной конструкции позволяет при незначительном увеличении массы на 5,8-15,1% увеличить длину пролета на 22,1-33,8% [29].

Т.о. в качестве основных направлений снижения металлоемкости широкозахватных дождевальных машин можно выделить как основные: увеличение длины пролетов между опорными тележками, уменьшение массы водопроводящего трубопровода за счет оптимизации ферменного пояса, шпренгельных систем и применения трубопровода с переменным диаметром труб по длине машины.

Таблица 3.6 – Характеристики ферменной конструкции ДМ «Кубань» и «КАСКАД» [29]

Тип ДМ	«Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)	«КАСКАД» (59,5м)	«КАСКАД» (65,25м)
Масса угольников шпренгельной системы на пролет, кг	198,12	209,74	228,21
Периметр шпренгельной системы на пролет, м	58,79	62,24	67,72
Длина пролета, м	48,7	59,5	65,25
Коэффициент металлоемкости фермы	1,2	1,04	1,04
Коэффициент массы угольников	4,0	3,5	3,5
Процент увеличения длины пролета, %	0	22,1	33,8
Процент увеличения массы угольников системы на пролет, %	0	5,8	15,1

3.6 Повышение эффективности использования земельных ресурсов Уменьшение воздействия ходовых систем на почву

Основными показателями физических свойств почвы, определяющими ее несущие свойства, являются механический состав, удельный и объемный вес, водопроницаемость и влажность.

Наиболее сильное влияние на изменение характеристик почвы имеет влажность. Ухудшение прочностных свойств почвы при увеличении влажности вызывает возрастание буксования колес и приводит к возрастанию потерь на перекачивание. Это наблюдается при работе ДМ с большими поливными нормами, когда почва на глубине 0,2-0,3 м увлажняется до предела текучести.

Характер влияния процесса полива на несущие свойства почвы четко прослеживается по динамике колесобразования. Рассмотрим более подробно.

При качении колес ДМ имеют место два основных вида деформации почвы: сжатие почвы опорной поверхностью и срез почвы зацепами колеса.

В своих исследованиях А.И. Рязанцев предлагает смоделировать данные процессы как взаимодействие с почвой конусно-крыльчатых наконечников пенетрирующих устройств для оценки прочности.

При этом сопротивление грунта сжатию может определяться зависимостью, кПа:

$$\sigma_{СЖ} = u_T \gamma_{гр} r_{КП} + N'_T c_{2Г}, \quad (3.72)$$

где u_T и N'_T – безразмерные коэффициенты несущей способности грунта, зависящие от угла внутреннего трения;

$\gamma_{гр}$ – объемный вес грунта, кН/м³;

$r_{КП}$ – радиус основания наконечника, м;

$c_{2Г}$ – удельное сцепление грунта, кПа.

В условиях испытаний грунтов непосредственно в поверхностном слое собственным весом грунта в пределах глубины погружения наконечника можно пренебречь. Поэтому касательную составляющую напряжений или другими словами удельное сопротивление почвы вращательному срезу в этих условиях с достаточной достоверностью можно отождествлять со сцеплением грунта: $\tau_{Г} = c_{2Г}$

Несущую способность почвы определяли согласно зависимости, кПа [61]

$$R_{дП} = 0,318 N'_K c_{2Г}, \quad (3.73)$$

N'_K – коэффициент, зависящий от величины угла внутреннего трения грунта.

Несущую способность почв после полива можно описать выражением:

$$R_{пП} = R_{дП} - \Delta P, \quad (3.74)$$

где $R_{дП}$ – несущая способность почвы до полива;

ΔP – величина уменьшения несущей способности почвы.

В процессе дождевания на первом этапе происходит инфильтрационный процесс, т.е. донасыщение почвы, определяемый параметром досточковой поливной нормы, затем второй этап – фильтрационный процесс, т.е. движение жидкости в нижние слои с образованием поверхностного стока.

При инфильтрационном процессе допускается, что чем меньше объемный вес почвы, т.е. чем больше в ней пор, тем больше ее инфильтрационная способность, а соответственно меньше несущая способность.

Несущие свойства почвы уменьшаются при увеличении поверхностного стока, определяемого характеристикой впитывания воды, интенсивностью, диаметром капель и др. характеристиками процесса фильтрации.

Анализ теоретических предпосылок показывает, что на изменение прочностных показателей почвы при поливе существенное влияние оказывают ее инфильтрационные свойства и режим орошения, определяемый природно-климатическими условиями и конструктивными особенностями дождевальными машин.

Зависимость несущих свойств почвы от режима орошения

Согласно исследованиям А.И. Рязанцева несущую способность почвы можно определить, кПа:

$$R_{\text{ПП}} = R_{\text{ДП}} - (1,4m_{\text{дост}}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{\text{ст}}}). \quad (3.75)$$

Как показали исследования оценки изменения несущей способности почвы от эффективных норм полива (300-600 м³/га), для наиболее часто встречающихся типов почв, величина уменьшения несущей способности почвы резко возрастает при увеличении значений досточковой нормы и еще в большей степени уменьшается при возрастании величины поверхностного стока.

Так, например, увеличение поливной нормы с 300 до 500 м³/га для средне-суглинистых черноземов вызывает уменьшение их несущих свойств с 160 до 140 кПа, а при наличии стока (20-25%) до 125 кПа.

В процессе полива при движении круговых машин по полю колесами ходовых опор создается колея.

Ширина образующейся колеи V_K зависит от диаметра опорных колес D_K , ширины обода b_K , глубины погружения колеса в грунт H'' , расстояния от неподвижной опоры R_{iM} и может быть записана в виде:

$$V_K = \sqrt{\left(R_{iM} + \frac{b_K}{2}\right)^2 + H''(D_K - H'')} - \left(R_{iM} - \frac{b_K}{2}\right), \quad (3.76)$$

Глубина колеи может быть выражена следующей зависимостью:

$$H'' = \frac{1,2Q_K}{R_{\text{ПП}} b_K \sqrt{D_K}}; \quad (3.77)$$

Тогда с учетом несущей способности почвы можно выразить:

$$H'' = \frac{1,2Q_K}{\left[R_{\text{ДП}} - (1,4m_{\text{дост}}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{\text{ст}}})\right] b_K \sqrt{D_K}}, \quad (3.78)$$

$$V_K = \left\{ \left(R_{iM} + \frac{b_K}{2}\right)^2 + \frac{1,2Q_K}{\left[R_{\text{ДП}} - (1,4m_{\text{дост}}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{\text{ст}}})\right] b_K \sqrt{D_K}} \right\} \times \quad (3.79)$$

$$\times \left(D_K - \frac{1,2Q_K}{\left[R_{\text{ДП}} - (1,4m_{\text{дост}}^{0,65} + 8 \cdot 1,01^{m_{\text{ст}}})\right] b_K \sqrt{D_K}} \right)^{0,5} - \left(R_{iM} - \frac{b_K}{2}\right),$$

Достоковая поливная норма, м³/га [122]:

$$m_{\text{дост}} = 2850 \left(1,14 - \sqrt[5]{d_K} \right) \frac{\rho_{\text{ср}}}{\rho_1} K; \quad (3.80)$$

где: Q_K – нагрузка на колесо, кН;

$R_{\text{ДП}}$ – несущая способность почвы, МПа;

$m_{\text{ст}}$ – величина стока, м³/га;

d_K – средний диаметр капель, мм;

ρ_{cp} – интенсивность дождя, мм/мин;

ρ_1 – заданная интенсивность дождя, мм/мин;

K – коэффициент, учитывающий водопроницаемость почв ($K=0,6-1,5$).

Установлено, что при поливе водой для обеспечения допустимого в конце поливного сезона максимального значения глубины колеи ($H''=15$ см), ее величина после первого прохода не должна превышать 5 ± 1 см. Эта глубина колеи обеспечивается при давлении колес машина почву не более 100 кПа. Давление 80-100 кПа рекомендуется и для сельскохозяйственных тракторов .

Исследования ДМ «Фрегат» показывают, что жесткие колеса за первый проход образуют колею более 0,05 м, так как их давление на почву превышает допустимое (100 кПа) - 160 кПа, таблица 3.7 [61].

Таблица 3.7 – Средние значения параметров колеи под жесткими колесами

Параметры колеи	Номер опорной тележки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ширина колеи по верху, м	0,265	0,26	0,25	0,257	0,270	0,272	0,258	0,230	0,225	0,22
Глубина колеи, м	0,081	0,08	0,07	0,066	0,061	0,062	0,063	0,056	0,055	0,05
Второй проход										
Ширина колеи по верху, м	0,270	0,27	0,26	0,260	0,270	0,275	0,265	0,240	0,230	0,22
Глубина колеи, м	0,12	0,01	0,09	0,09	0,075	0,08	0,070	0,065	0,065	0,06

Наибольшая глубина колеи у первых опор, и уменьшается она к концу машины. Это происходит потому, что по мере удаления от неподвижной опоры увеличивается скорость движения тележек и сокращается время воздействия колес на почву.

С увеличением числа проходов, растет глубина колеи. В конце поливного сезона, после 10-12 проходов глубина колеи может достигать 0,3-0,45 м [61]. Глубокая колея отрицательно воздействует на ходовые характеристики машины, приводит к буксованию колес и переполиву.

На глубину колеи влияет агрофон. Согласно исследованиям Рязанцева А.И. на всех агрофонах за один проход глубина образующейся колеи от жестких колес не бывает меньше 0,08...0,09 м [61], а согласно агротребований она не должна быть более 0,05 м.

Опыт эксплуатации ДМ «Фрегат» на серийных ходовых системах показывает, что машина становится неработоспособной в среднем после 10 прохода, при глубине колеи, достигающей 1/3 диаметра колеса.

Теоретические зависимости глубины колеи от несущей способности почвы при различной длине пролетов на примере ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и «КАСКАД», построенные в соответствии с выражением (3.78) представлены на рис. 3.40-3.41.

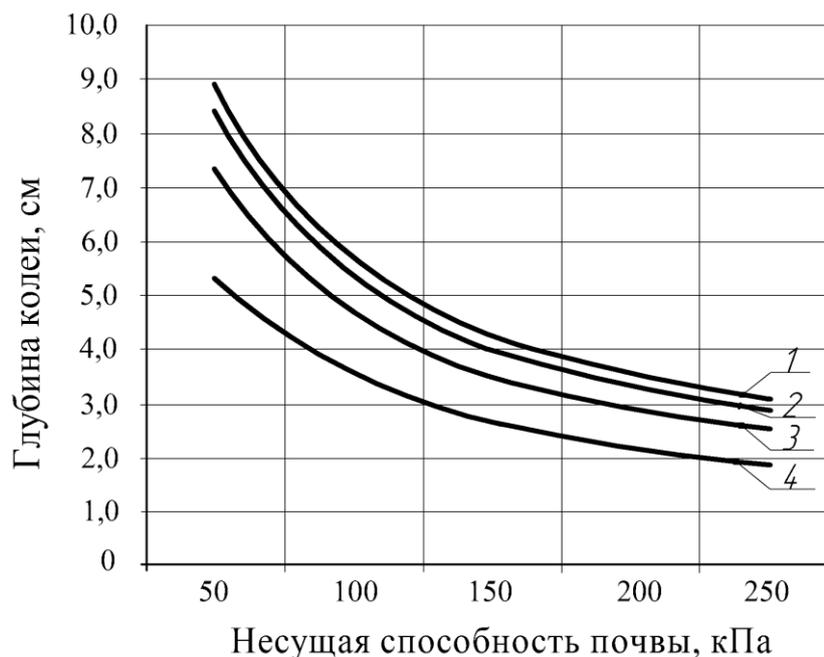


Рисунок 3.40 – Зависимость глубины колеи от несущей способности почвы для ДМ «Кубань-ЛК1» (КАСКАД) (шины 14,9-24) (труба 159мм) для первой опоры: 1 – пролет 65м; 2 – пролет 59,5 м; 3 – пролет 48,7 м; 4 – пролет 30 м

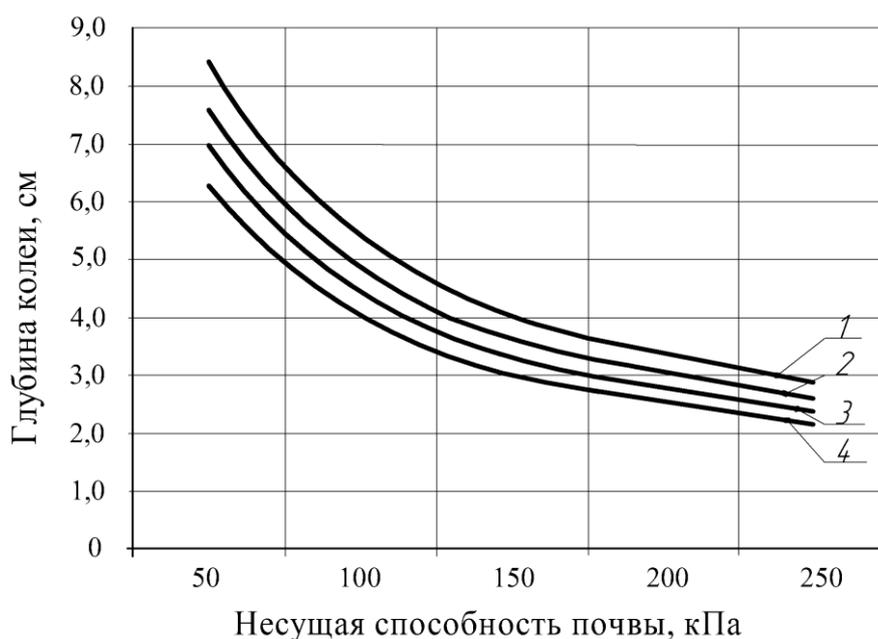


Рисунок 3.41 – Зависимость глубины колеи от несущей способности почвы для ДМ «КАСКАД» пролет 59,5 м (труба 159 мм) для первой опоры: 1 – шины 14,9-24; 2 – шины 16,9-24; 3 – шины 18,4-24; 4 – шины 23,1-26

Рассматривая зависимость величины колеи от несущей способности почвы при различной длине пролетов на примере ДМ «КАСКАД», можно сделать вывод о возможности увеличения пролета до 65 м, при которых величина колеи не превышает нормативных значений при несущей способности более 100 кПа и поливной норме порядка 300-350 м³/га [29].

Для почв с низкой несущей способностью и машин с длиной пролетов более 59 м рационально применение колес с шинами не менее 16,9-24, а при уменьшении несущей способности - шины 18,4-26 [29].

Теоретические зависимости ширины колеи от порядкового номера опорной тележки на примере ДМ «КАСКАД», построенные в соответствии с выражением (3.79) представлены на рис. 3.42.

Ширина колеи для всех модификаций машин и колес уменьшается с увеличением расстояния от центральной опоры.

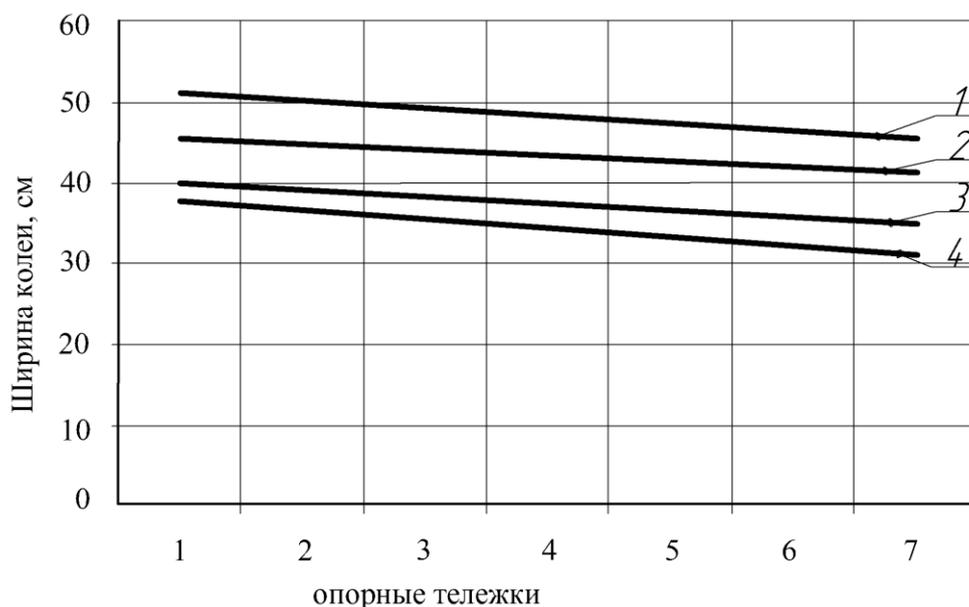


Рисунок 3.42 – Зависимость ширины колеи от порядкового номера опорной тележки (расстояние от основной опоры) для ДМ «КАСКАД» (несущая способность почвы 100 кПа): 1– шины 18,4-24; 2 – шины 16-20; 3 – шины 15,5-38; 4 – шины 14,9-24.

Для уменьшения глубины колеи возможно применение колес более широкого профиля или снижение массы за счет уменьшения диаметра трубопровода, что целесообразно при работе с меньшими расходами.

Снижение площади уплотнения ходовыми системами

Уплотняемая колесами машин площадь поля определяется выражением:

$$S_{\Pi} = \sum l_{iT} B_K, \quad (3.81)$$

где $\sum \ell_{iT}$ – суммарная длина пути всех тележек;

B_K – средняя ширина колеи, м.

Для первой опорной тележки $\ell_{1T} = 2\pi\ell_{\Pi}$; для второй $\ell_{2T} = 2\pi 2\ell_{\Pi}$;

для десятой $\ell_{10T} = 2\pi 10\ell_{\Pi}$, для i -ой $\ell_{iT} = 2\pi i\ell_{\Pi}$,

n_T – количество опорных тележек; ℓ_{Π} – длина пролета, м.

Общая длина для i тележек:

$$\begin{aligned} \sum \ell_{iT} &= \ell_{1T} + \ell_{2T} + \dots + \ell_{m_T T} = 2\pi\ell_{\Pi} + 2\pi 2\ell_{\Pi} + 2\pi 3\ell_{\Pi} + \dots + 2\pi m_T \ell_{\Pi} = \\ &= 2\pi\ell_{\Pi}(1 + 2 + 3 + \dots + m_T) = \pi\ell_{\Pi} m_T (1 + m_T), \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$S_{\Pi} = \pi\ell_{\Pi} n_T B_K (1 + n_T), \quad (3.83)$$

Рассмотрим площади уплотнения для ДМ длиной 500 м. При длине пролета 48,7 м ходовая система будет представлять собой 10 тележек. При длине 59,5 – 8 тележек. При длине пролета 65,2 – 7 тележек [29].

Т.о. уплотняемая колесами машин площадь зависит от количества тележек и ширины колеи. При увеличении длины пролета количество тележек сокращается, соответственно уменьшается уплотняемая площадь. Данные по площади уплотнения представлены в таблице 3.8 и на рис.3.43.

Таблица 3.8 – Площадь уплотнения ходовыми системами

Порядковый номер пролета	Длина пути, м	Площадь уплотнения ходовыми системами, м ²			
		14,9-24	15,5-38	16,9-24	18,4-26
1	2	3	4	5	6
«Кубань-ЛК1М» с пролетом 48,7 м					
1 пролет	305,83	110,1	116,21	134,56	152,91
2 пролет	611,67	220,2	232,43	269,13	305,83
3 пролет	917,50	330,3	348,65	403,70	458,75
4 пролет	1223,34	440,4	464,87	538,26	611,67
5 пролет	1529,18	550,5	581,08	672,84	764,59
6 пролет	1835,01	660,6	697,30	807,40	917,50
7 пролет	2140,85	770,7	813,52	941,97	1070,42
8 пролет	2446,68	880,8	923,73	1076,54	1223,34
9 пролет	2752,52	990,9	1045,95	1211,1	1376,26
10 пролет	3058,36	1101,0	1162,17	1345,67	1529,18
Итого	16820,94	6055,53	6391,95	7401,2	8410,45
«КАСКАД» с пролетом 59,5 м					
1 пролет	373,66	134,51	141,99	164,41	186,83
2 пролет	747,32	269,03	283,98	328,82	373,66
3 пролет	1120,98	403,55	425,97	493,23	560,49
4 пролет	1494,64	538,07	567,96	657,64	747,32
5 пролет	1868,30	672,58	709,95	822,05	934,15
6 пролет	2241,96	807,10	851,94	986,46	1120,98
7 пролет	2615,62	941,62	993,9	1150,87	1307,81
8 пролет	2989,28	1076,14	1135,92	1315,28	1494,64
Итого	13451,7	4842,6	5111,59	5918,71	6725,8
«КАСКАД» с пролетом 65,2 м					
1 пролет	409,45	147,40	155,59	180,15	204,72
2 пролет	818,91	294,81	311,18	360,32	409,45
3 пролет	1228,36	442,21	466,77	540,47	614,18

4 пролет	1637,82	589,61	622,37	720,64	818,91
5 пролет	2047,28	737,02	777,96	900,80	1023,64
6 пролет	2456,73	884,42	933,55	1080,96	1228,36
7 пролет	2866,19	1031,82	1089,15	1261,12	1433,09
Итого	11464,7	4127,29	4356,57	5044,46	5732,35

Т.о. для пролета 48,7 м (шины 18,4-26) площадь уплотнения составляет 8410,45 м², в то время как при 59,5 м – 6725,8 м² и при 65,2 м – 5732,35 м², что соответственно меньше на 20 и 31,8%. Разница площади уплотнения между машинами с пролетом 48,7 и 65,2 м составляет 0,34% от всей площади полива [29].

Необходимо отметить, что при искривлениях водопроводящего трубопровода и сдвиге колеи площадь уплотнения ходовыми системами будет возрастать.

3.7 Влияние нагрузки, приходящейся на ходовые системы на сопротивление передвижению машины

Нагрузка, приходящаяся на ось колеса, оптимизируется диаметром водопроводящего трубопровода и частотой расстановки ходовых тележек, т.е. длиной пролета.

Возможность движения тележки ДМ определяется условием:

$$(\mu - f)n_k \geq i \quad (3.84)$$

где μ – коэффициент сцепления;

f – коэффициент сопротивления качению;

n_k – число колес на тележке ДМ;

i – величина уклона на подъем.

Возможность движения самой ДМ определяется так:

$$(\mu - f)n_k n_t \quad (3.85)$$

С учетом выражения **Ошибка! Источник ссылки не найден.**):

$$(\mu - f)n_k(L_m/l_{пр}) \quad (3.86)$$

где L_m – длина машины, м;

$l_{пр}$ – длина пролета, м.

Допустим, при длине машины 300 м и пролете 48,7 м соотношение составляет 6,1, для пролета 65,25 м – 4,59.

Для пролета 48,7 м:

$$(\mu - f)6,1 \quad (3.1)$$

Для пролета 65,25 м:

$$(\mu - f)4,6 \quad (3.88)$$

т.е. при увеличении пролета проходимость уменьшается на 25%.

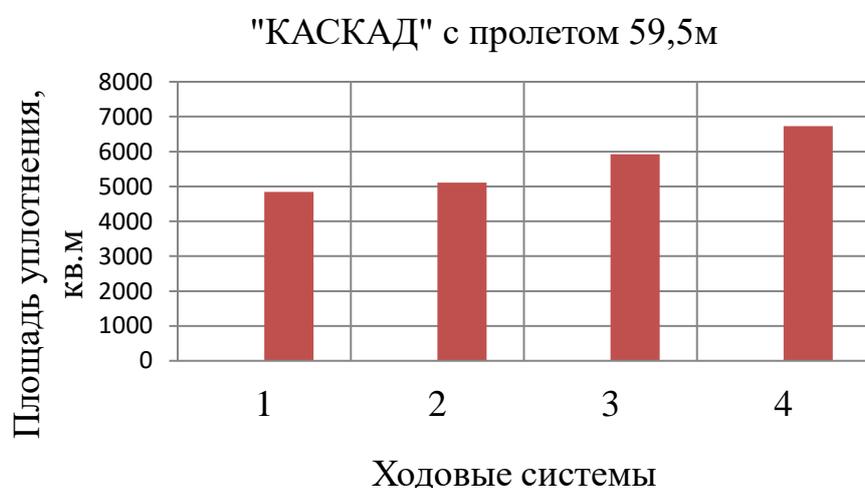
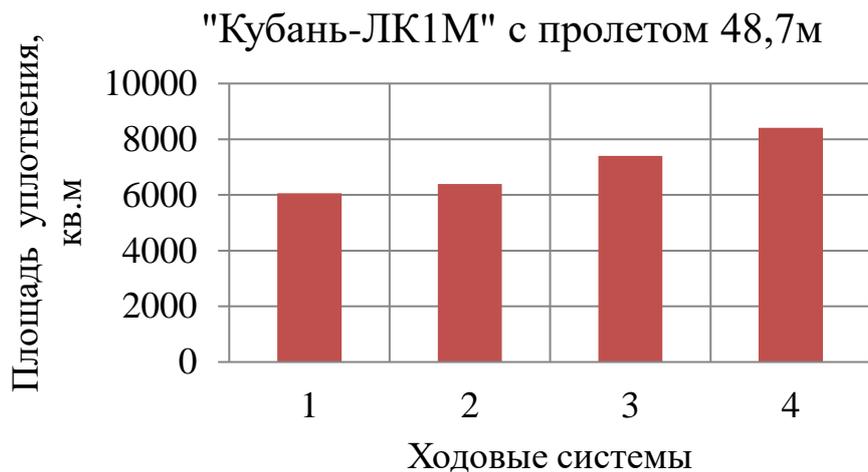


Рисунок 3.43 – Площадь уплотнения в зависимости от длины пролета для ходовых систем с шинами: 1 –14,9-24; 2 –15,5-38; 3 –16,9-24; 4 –18,4-26

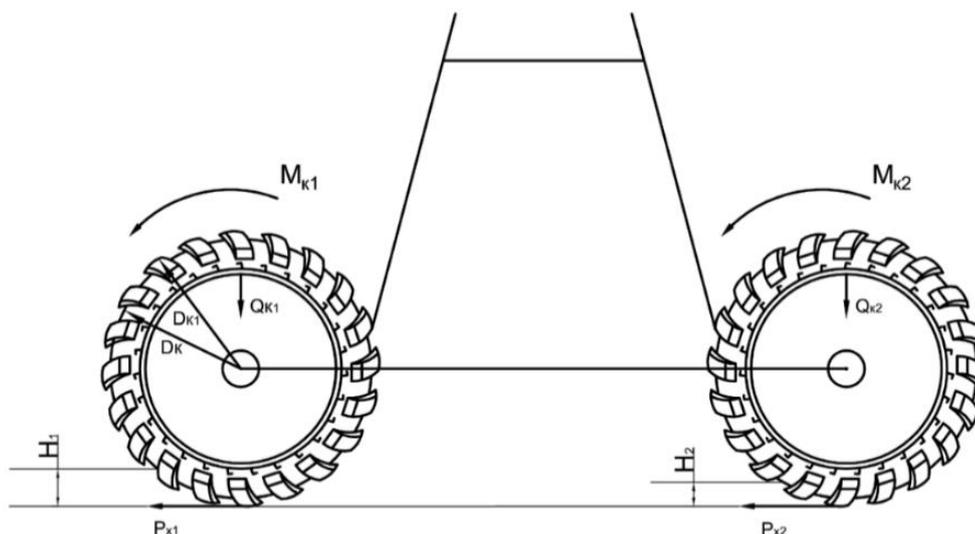


Рисунок 3.44 – Схема качения колесных систем ДМ

При качении колеса по сминаемой почве передаваемый крутящий момент $M_{кр}$ определяется зависимостью, рисунок 3:

$$M_{кр} = \tau_{ср} k'_\tau \quad (3.89)$$

А наибольшая сила сцепления $P_{сц}$ ведущего колеса с почвой:

$$P_{сц} r_k = \tau_{ср} k'_\tau \quad (3.90)$$

где k'_τ – момент сопротивления (статический момент поверхности среза);
 r_k – радиус колеса;

$\tau_{ср}$ – удельное сопротивление срезу почвозацепами колеса.

Из равенства (3.) можно определить максимальную силу сцепления:

$$P_{сц} = \tau_{ср} k'_\tau / r_k \quad (3.91)$$

Удельное сопротивление срезу имеет вид:

$$\tau_{ср} = P \operatorname{tg} \varphi + C_2 \quad (3.92)$$

где P – удельное давление колеса на почву;

φ – угол внутреннего трения;

C_2 – сцепление почвы.

Согласно исследованиям Рязанцева А.И., в условиях испытания почв на вращательный срез с помощью крыльчатых наконечников собственным весом почвы в пределах глубины погружения можно пренебречь. Т.е. удельное сопротивление вращательному срезу, определяемому также выражением (3.) с достаточной точностью, может быть отождествлено со сцеплением почвы, которое определяется по вращательному моменту и константе крыльчатого наконечника k_τ [8].

$$C_2 = M_{\max} / k_\tau \quad (3.2)$$

При погружении конического наконечника теоретически доказано наличие пропорциональности между сцеплением грунта и величиной удельного сопротивления пенетрации:

$$R_n = P / h_k^2 \quad (3.94)$$

$$C_2 = k_\varphi R_n \quad (3.95)$$

где k_φ – функция пропорциональности, зависящая от угла при вершине конического наконечника и угла внутреннего трения.

Срез почвы при движении колеса происходит ее боковыми кромками и тыльной частью почвозацепов. Статический момент поверхности среза определяется следующим выражением:

$$k'_\tau = \frac{\sqrt{D_K H} (D_{K1}^2 - D_K^2) D_{K1} - D_K}{D_K} + b_n \quad (3.96)$$

где H – глубина колеи;

b_n – ширина почвозацепа;

D_K – диаметр колеса;

D_{K1} – диаметр окружности по вершинам почвозацепов;

Известно, что площадь поверхности среза зависит от глубины колеи и размеров почвозацепов.

Применительно к ходовой системе тележек ДМ, когда заднее колесо движется по следу переднего, $P_{сц}$ определяется следующей зависимостью:

$$P_{сц} = \frac{\sqrt{D_K}}{3D_K^2} (\tau_{ср1}\sqrt{H_1} + \tau_{ср2}\sqrt{H_2}) ((D_{K1}^2 - D_K^2)((D_{K1} - D_K) + 3b_n)) \quad (3.3)$$

где H_1, H_2 – глубина колеи после прохода переднего и заднего колеса соответственно;

$\tau_{ср1}, \tau_{ср2}$ – удельные сопротивления почвы срезу до и после прохода переднего колеса соответственно.

С целью уменьшения нагрузки, приходящейся на ось колес, может быть установлена трехколесная ходовая система. В этой системе три колеса располагаются друг за другом – тандемная схема расстановки.

Сила сцепления данной ходовой системы определяется следующей формулой :

$$P_{сц} = \frac{\sqrt{D_K}}{3D_K^2} (\tau_{ср1}\sqrt{H_1} + \tau_{ср2}\sqrt{H_2} + \tau_{ср3}\sqrt{H_3}) ((D_{K1}^2 - D_K^2)((D_{K1} - D_K) + 3b_n)) \quad (3.98)$$

где H_3 – глубина колеи после прохода третьего колеса;

$\tau_{ср3}$ – удельное сопротивление почвы срезу после прохода второго колеса.

Сила сопротивления качению P_f с учетом известных положений определяется по выражению для двухколесной тележки:

$$P_f = 0,88 \sqrt{\frac{G_K^3}{BD_K^3} \frac{\sqrt{P_{дпп1}} + \sqrt{P_{дпп2}}}{\sqrt{P_{дпп1} P_{дпп2}}}} \quad (3.99)$$

где $P_{дпп1}, P_{дпп2}$ – несущая способность почвы до и после прохода переднего колеса;

G_K – нагрузка на колесо.

Зависимости силы сцепления и силы сопротивления качению от нормы полива для различных пролетов представлены на рисунке 3..

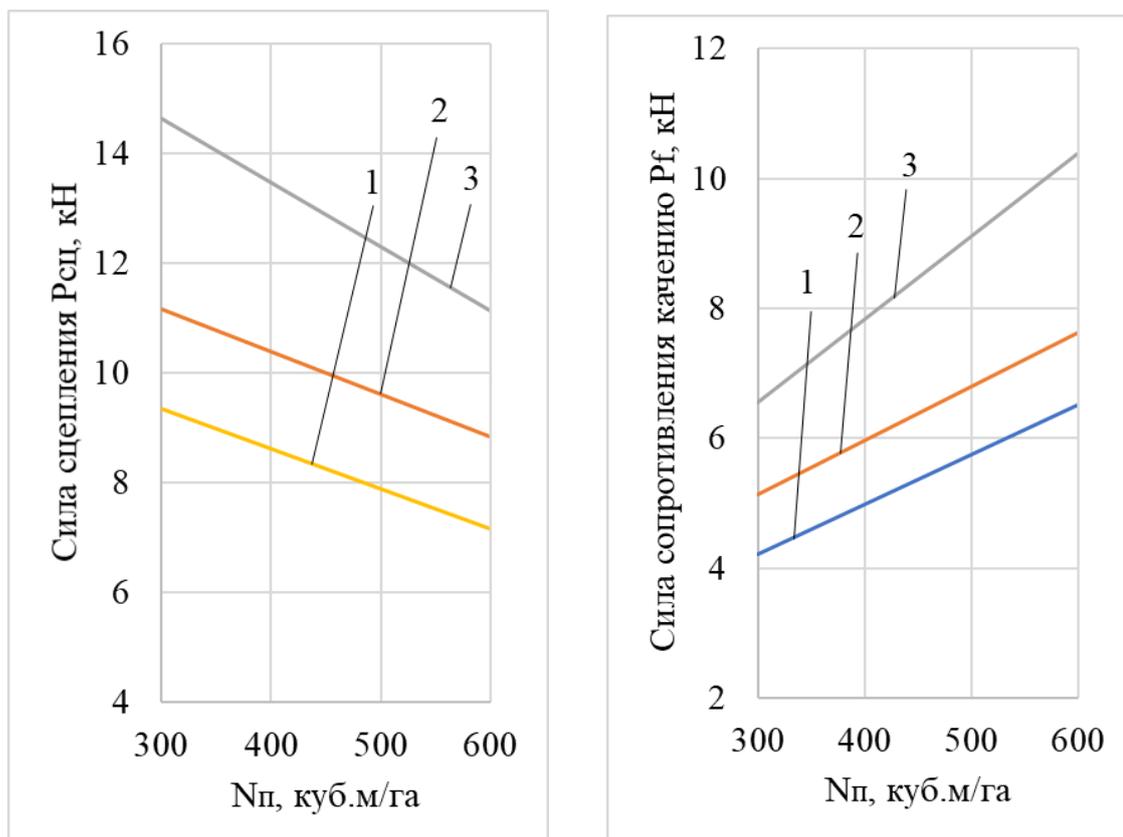


Рисунок 3.45 – Зависимость силы сцепления и силы сопротивления качению от нормы полива для чернозема обыкновенного: 1 – пролет 48,7 м; 2 – пролет 59,5 м; 3 – пролет 65,25 м

Из полученного графика (рисунок 3.) видно, что сила сцепления уменьшается с увеличением нормы полива, особенно значительно при увеличенных до 65,25 м пролетах.

Сопротивление качению при увеличении нормы полива значительно возрастает, тем в большей степени, чем длиннее пролет машины.

Т.о. были рассмотрены методы повышения проходимости ДМ на основе проведенного анализа влияющих факторов.

Для обеспечения проходимости ДМ при поливе различными нормами были найдены закономерности колеобразования и изменения тягово-сцепных свойств и обоснованы конструктивных параметры ДМ.

На основе теоретических исследований воздействия ходовых систем широкозахватных дождевальных машин с пневматическими и жесткими колесами на почву были даны рекомендации оптимальных соотношений конструктивных параметров водопроводящего трубопровода, длин пролетов и типов ходовых систем в зависимости от норм полива и несущей способности почвы.

Чтобы применить данные теоретических расчетов и методик на ДМ необходимо провести экспериментальные исследования для проверки эффективности их применения.

4 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛИВА ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫМИ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ

4.1 Оптимизация режима работы и основных параметров электрифицированных дождевальных машин кругового действия

Современные электрифицированные дождевальные машины имеют большой диапазон регулирования поливных норм, режимов движения и возможность выдавать заданную поливную норму разными способами или по разным схемам полива.

Оптимальные варианты определяются исходя из ограничивающих условий, в большинстве случаев это величина эрозионно-допустимой поливной нормы или водопотребления орошаемой сельскохозяйственной культуры.

Необходимо учитывать, что полив дождевальными машинами большой длины при движении с малой скоростью для обеспечения значительных норм полива может длиться до полутора недель и в напряженные периоды вегетации отдельные участки можно пересушить ниже допустимого.

В общем случае, работа широкозахватных электрифицированных дождевальных машин в режиме «старт-стоп» совмещает полив в движении с позиционным поливом [45]. Установкой на процентном таймере соотношения между периодами движения и остановкой задается скорость движения последней тележки и выдаваемая норма полива.

Установка задающего таймера производится заданием в секундах длительностью импульса (И) и паузы (П), соотношение которых определяет продолжительность включения (ПВ%) электродвигателя крайней опорной тележки в течение цикла в зависимости от требуемой нормы полива [56-58].

$$\text{ПВ}\% = \frac{\text{И}}{\text{И} + \text{П}} 100\%, \quad (4.1)$$

где И – длительность импульса;

П – длительность паузы.

Для требуемой нормы полива $m_{\text{тр}}$ при минимальной норме полива по m_{min} устанавливается продолжительность включения:

$$\text{ПВ}\% = \frac{m_{\text{min}}}{m_{\text{тр}}} 100\%, \quad (4.2)$$

Чем меньше время импульса «старт» и больше время паузы «стоп», тем выше значение нормы полива.

Норму полива за проход машины можно представить в виде:

$$M = m_{\text{СТ}} + m_{\text{ДВ}}, \quad (4.3)$$

$m_{\text{СТ}}$ – позиционная норма полива, $\text{м}^3/\text{га}$;

$m_{\text{ДВ}}$ – норма полива, выдаваемая в процессе движения машины, $\text{м}^3/\text{га}$.

Скорость движения тележки можно выразить как

$$V_T = \Delta S_M / t_{ДВ}, \quad (4.4)$$

ΔS_M – шаг движения машины;

$t_{ДВ}$ – время движения машины;

a шаг

$$\Delta S_M = \ell / n_{Ш}, \quad (4.5)$$

ℓ_s – длина дуги траектории движения тележки;

$n_{Ш}$ – число шагов.

$$\ell = 2\pi L_M. \quad (4.6)$$

При расчете следует принимать не паспортную, а фактическую скорость движения дождевальную машину, поскольку при движении имеет место пробуксовывание. Оно зависит от агрофона, типа почвы, скорости передвижения машины, влажности почвы. Из-за снижения скорости тележки возникает переполив.

Фактическая скорость движения машин всегда ниже паспортной, а выдаваемая норма полива несколько выше, что необходимо учитывать при задании режимов орошения.

Шаг машины с учетом коэффициента буксования принимает вид, м:

$$\Delta S_M = V_T t_{ДВ} \beta_T / 60, \quad (4.7)$$

β_T – коэффициент буксования.

Таким образом, происходит замедление скорости движения машины между позициями и средней скорости движения, что уменьшит шаг машины.

Среднюю скорость движения в зависимости от времени цикла и коэффициента буксования можно определить по формуле, м/с:

$$V_{СР} = 60 \Delta S_M \beta_T / t_{Ц}, \quad (4.8)$$

Время каждого цикла для машин «Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М» и «КАС-КАД» $t_{Ц} = 100$ с. Оно включает время движения и стоянки машины.

Рассмотрим процессы, происходящие в почве при движении машины и выдаче поливной нормы.

В начале вегетационного периода сельскохозяйственных культур начальные влагозапасы определяются по формуле [55], м³/га :

$$W_0 = 100 h \gamma_{ГР} \beta_H, \quad (4.9)$$

h – расчетный слой увлажнения почвы, мм;

$\gamma_{ГР}$ – плотность почвы в расчетном слое, кг/м³;

β_H – влажность почвы равная наименьшей влагоемкости, % от сухой массы почвы.

Уравнение водного баланса активного слоя применительно к одному поливу определяется из выражения [55, 73]:

$$E_t = (W_0 - W_K) + M + P_{ОС} + V_{ГР} - \Pi_0, \quad (4.10)$$

E_t – суммарное водопотребление, равное интенсивности водопотребления, мм, за определенный отрезок времени;

W_K – влагозапасы после воздействия дождя (конечные влагозапасы), м³/га;

M – поливная норма; P_{OC} – осадки; $V_{ГР}$ – подпитка грунтовыми водами; и P_0 – потери на сток и фильтрацию, $m^3/га$.

Для упрощения P_{OC} , $V_{ГР}$ и P_0 можно пренебречь или их величину учесть в поливной норме.

Влагозапас активной зоны (W_K) до прохода дождевальнoй машины [55], $m^3/га$:

$$W_K = W_0 - Et, \quad (4.11)$$

t – время от начала полива (начальная точка движения последней тележки по окружности, равной радиусу полива) до подхода к конечной точке полива, сут. Конечная точка полива зависит от выбранной схемы движения. При поливе за круг – это время оборота машины. При поливе половины круга с реверсом – время прохождения некоторой части дуги окружности.

Как только суммарное испарение за сутки превысит запас продуктивной влаги, соответствующей влажности в активном слое почвы 80% НВ, должен быть назначен полив. Норма полива рассчитывается по формуле [55], $m^3/га$

$$M = 100h\gamma_{ГР}(\beta_{НВ} - \beta_{0,8НВ}), \quad (4.12)$$

$\beta_{НВ}$ – влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости в расчетном слое почвы; $\beta_{0,8НВ}$ – влажность, соответствующая предполивному порогу 80% НВ в активном слое почвы.

Порог увлажнения выражается в процентах от наименьшей влагоемкости (НВ). Согласно рекомендациям, в условиях засушливого вегетационного периода, рекомендуется поддерживать предполивной порог влажности почвы для кукурузы в слое 0-60 см не ниже 70-75 % НВ, картофеля не ниже 80 % НВ в слое 0-60 см. Для лука 80 % НВ в слое 0-50 см, моркови летней посадки не ниже 80-85 % НВ в слое почвы 0-60 см [55].

Максимально доступная влага в почве равна наименьшей влагоемкости за вычетом влаги устойчивого завядания (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Плотность и полная влагоемкость почвы

Типы почв	Механический состав	Плотность, $кг/м^3$	Полная влагоемкость метрового слоя	
			% к весу сухой почвы	$m^3/га$
Сероземы	Легкие	$1,5 \cdot 10^3 - 1,44 \cdot 10^3$	12,0 – 17,4	1800 – 2500
	Тяжелые	$1,4 \cdot 10^3 - 1,32 \cdot 10^3$	18,6 – 26,0	2600 – 3400
Каштановые	Легкие	$1,45 \cdot 10^3 - 1,34 \cdot 10^3$	12,4 – 19,3	1800 – 2600
	Тяжелые	$1,38 \cdot 10^3 - 1,27 \cdot 10^3$	19,5 – 24,5	2700 – 3100
Черноземы	Легкие	$1,62 \cdot 10^3 - 1,41 \cdot 10^3$	13,6 – 19,8	2200 – 2800

	Тяжелые	$1,42 \cdot 10^3 - 1,36 \cdot 10^3$	20,3 – 30,0	2900 – 4100
--	---------	-------------------------------------	-------------	-------------

Рассмотрим полив поля, засеянного одной культурой, пренебрегая колебаниями водопотребления (E , мм/сут) за время полива (t , сут), а также при отсутствии осадков.

Определяющим условием будет неравенство [73]:

$$\beta_n \leq \beta(\varphi, t) \leq 100\% \text{ НВ}, \quad (4.13)$$

$\beta(\varphi, t)$ – влажность расчетного слоя почвы в точке поля с угловой координатой

φ в момент времени t , %НВ;

Условие выдачи заданной поливной нормы за несколько проходов можно записать в виде [73]:

$$M = M_1(\varphi) + M_2(\varphi) + M_3(\varphi) \dots + M_n(\varphi), \quad (4.14)$$

M – заданная поливная норма, $\text{м}^3 / \text{га}$;

$M_1(\varphi)$ – поливная норма в точке начала поля при движении машины из точки $\varphi=0$ (первый проход), $\text{м}^3 / \text{га}$;

$M_2(\varphi)$ и $M_3(\varphi)$ – поливная норма за второй и третий проходы, $\text{м}^3 / \text{га}$;

$M_n(\varphi)$ – поливная норма за n -ый проход.

Рассмотрим случай работы машины с реверсом, когда не происходит вращения машины в исходную точку после прохождения полного круга. Т.е. машина возвращается в точку φ , двигаясь в обратном направлении реверсивно. В этом случае полив той же нормой в начале возврата вызывает сток и требуется упрощенная корректировка. При выдаче поливной нормы за два прохода, рис. 4.1.

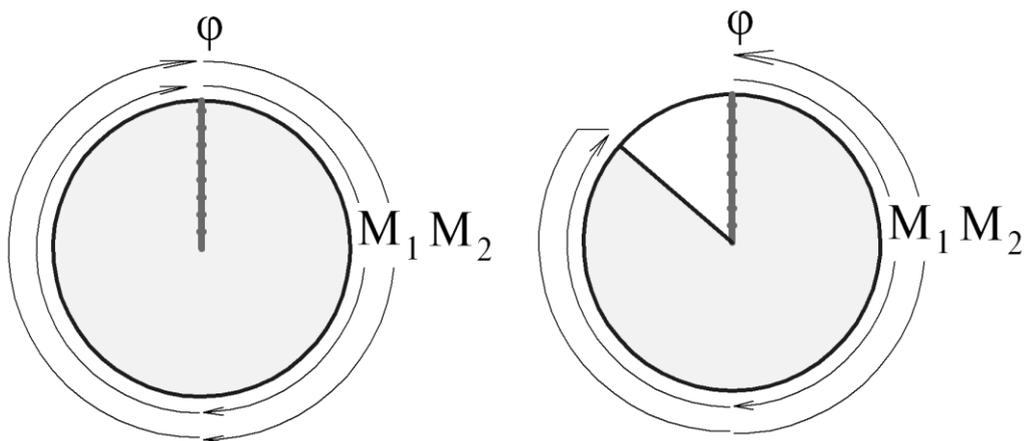


Рисунок 4.1– Схема выдачи поливной нормы

$$M = M_1(\varphi) + M_2(\varphi). \quad (4.15)$$

При движении в прямом ходе начальные влагозапасы при $t=0$ расчетного слоя W_0 непосредственно перед машиной будут уменьшаться на $10Et$ (10 – коэффициент перевода мм в $1 \text{ м}^3 / \text{га}$) [64, 74, 76], сут:

$$t = \frac{1}{1440 K_{\text{СУТ}}} \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{V_{\text{CP}}(\varphi)}, \quad (4.16)$$

где 1440 – коэффициент перевода минут в сутки 60x24;

$V_{\text{CP}}(\varphi)$ – скорость движения машины, м/мин;

$K_{\text{СУТ}}$ – коэффициент времени.

Слой осадков за проход по кругу [64]:

$$h = \frac{1200 Q_M}{R_M V_{\text{CP}}}, \quad (4.17)$$

Предположим, что дождевальная машина кругового действия должна обеспечить выдачу поливной нормы M согласно [25, 74], м³/га:

$$\frac{M}{10} \equiv h, \quad (4.18)$$

h – слой осадков, мм.

$$M = \frac{12000 Q_M}{R_M V_{\text{CP}}}, \quad (4.19)$$

Q_M – расход машины, л/с

где R_M – радиус полива, равный длине машины, м; $R_M = L_M + R_{\text{КДА}}$.

$R_{\text{КДА}}$ – радиус захвата концевым дождевальным аппаратом (при наличии), м;

V_{CP} – средняя скорость движения машины.

$T_{\text{ПОЛ}}$ – среднее время полива ДМ за круг, ч.

При прохождении части круга будет полит сектор с площадью, рис. 4.2.

$$S_{\text{СЕК}} = \frac{\pi R_M^2 \varphi_C}{360} = \frac{\ell_{\text{СЕК}} R_M}{2}. \quad (4.20)$$

Расстояние, пройденное тележкой, т.е. часть дуги – s .

Тогда при прохождении не полного круга

$$M'_1 = 2\pi \frac{12000 Q_M}{\ell_{\text{СЕК}} V_{\text{CP}}}. \quad (4.21)$$

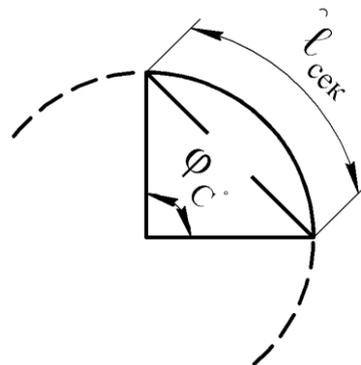


Рисунок 4.2 – Схема для полива сектора
При прохождении части круга:

$$t = \xi \int_0^{\varphi} M_1(\varphi) d\varphi, \quad \xi = \frac{s}{432 \cdot 10^3 K_{\text{СУТ}} Q_M}. \quad (4.22-4.23)$$

Мгновенная интенсивность дождя для машин кругового действия определяется по формуле, мм/мин:

$$\rho_{\text{МГ}} = \frac{120Q_M}{R_M^2 \varphi_C}, \quad (4.24)$$

φ_C – угол сектора захвата в данный момент времени.

Изменение влагозапасов в почве перед машиной в прямом ходе при поливе части круга можно представить как:

$$f_1(\varphi) = W_0 - 10E \xi \int_0^{\varphi} M'_1(\varphi) d\varphi. \quad (4.25)$$

После прохода машины в момент времени t влагозапасы будут определяться

$$W_1 = f_1(\varphi) + M'_1(\varphi), \quad (4.26)$$

Если при движении в обратную сторону перед машиной влагозапасы в почве представить функцией $f_2(\varphi)$, то позади нее они определяются из выражения

$$W_2 = f_2(\varphi) + M'_2(\varphi). \quad (4.27)$$

Связь между функциями $f_1(\varphi)$ и $f_2(\varphi)$ можно получить исходя из следующих соображений. В точку φ повторно машина попадает через промежуток времени Δt , пройдя путь s .

В общем виде

$$\Delta t = \xi \int_{\varphi}^s [M'_1(\varphi) + M'_2(\varphi)] d\varphi = \xi(s - \varphi)M, \quad (4.28)$$

s – путь, проходящий последней тележкой.

Максимальное значение пути, пройденное тележкой в одну сторону, соответствует длине дуги окружности траектории движения тележки

$$s_{\text{МАХ}} = \ell = 2\pi R_M, \quad (4.29)$$

Частный случай – полив половины окружности, рис. 4.3

Время Δt , складывается из времени достижения половины дуги окружности в прямом проходе и времени обратного движения.

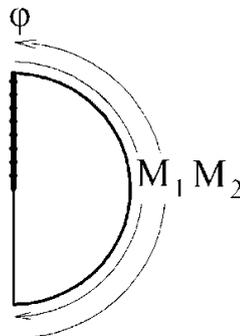


Рисунок 4.3 –Схема выдачи поливной нормы по половине окружности (с реверсом)

$$\Delta t = \xi \int_{\varphi}^{\ell/2} [M_1(\varphi) + M_2(\varphi)] d\varphi = \xi \left(\frac{\ell}{2} - \varphi \right) M, \quad (4.30)$$

Тогда:

$$f_2(\varphi) = f_1(\varphi) + M'_1(\varphi) - 10\xi E(s-\varphi)M. \quad (4.31)$$

$$f_2(\varphi) = f_1(\ell) = W_0 = \text{const}, \quad (4.32)$$

W_0 – минимально допустимые влагозапасы расчетного слоя почвы, м³/га

E – интенсивность водопотребления, мм/сут.

Дифференцируя выражение (4.31) и учитывая (4.25) и (4.32), получим

$$\frac{dM'_1(\varphi)}{d\varphi} - 10E\xi M'_1(\varphi) = -10E\xi M, \quad (4.33)$$

Тогда с учетом выражения (4.21):

$$M'_1(\varphi) = 2\pi \frac{1200Q_M}{\ell_{\text{СЕК}} V_{\text{CP}}(\varphi)} \left[1 - e^{10E\xi(\varphi-s)} \right], \quad (4.34)$$

$$M'_2(\varphi) = 2\pi \frac{1200Q_M}{\ell_{\text{СЕК}} V_{\text{CP}}(\varphi)} e^{10E\xi(\varphi-s)}. \quad (4.35)$$

Т.о. задавая путь, который проходит последняя тележка, можно определить оптимальное значение нормы при поливе в одну и в обратную сторону. Поскольку конструктивно норма полива меняется при движении не непрерывно, разбиваем общую поливную площадь на сектора, в заданных точках которых будет меняться скорость машины и, следовательно, норму полива.

В зависимости от общего количества секторов и номера сектора, получим:

$$M'_i = 2\pi \frac{1200Q_M}{\ell_{\text{СЕК}} V_{\text{CP}}(\varphi)} \left[1 - \frac{1}{(1 + 10E\xi \ell_{\text{СЕК}})^{n+1-i}} \right], \quad (4.36)$$

i – номер участка от начала поля, $i=1, 2, \dots, n$;

n – общее количество участков разбиения;

M_i – поливная норма на i -ом участке.

Здесь $\ell_{\text{СЕК}} = 2\pi R_M / n$.

Величина осадков, подпитка грунтовыми водами и потери на сток и фильтрацию могут быть учтены для специфических условий эксплуатации корректирующим коэффициентом, зависящий от региона местности, климатических и почвенных условий ψ в границах 0,9-1,1. Его определение требует дополнительных экспериментальных исследований.

$$M'_i = 2\psi\pi \frac{1200Q_M}{\ell_{\text{СЕК}} V_{\text{CP}}(\varphi)} \left[1 - \frac{1}{(1 + 10E\xi \ell_{\text{СЕК}})^{n+1-i}} \right], \quad (4.37)$$

При обратном движении нормы полива отсчитываются таким же образом, только в обратном порядке.

Рассмотрим пример для полива половины поливного круга с реверсом. Условия: Задаваемая поливная норма 300 м³/га. Длина машины 300 м.

Коэффициент использования времени 0,8. Расход машины 41 л/с. Водопо потребление 7 мм/сут. Корректировка норм полива по схеме с реверсом представлена на рис. 4.4. Оптимизация выдачи поливной нормы при делении на 4 сектора представлена на рис. 4.5. Оптимизация выдачи поливной нормы при делении на 6 участков – на рисунке 4.6.

Для расчетов необходимо знать водно-физические свойства почвы, режим орошения и интенсивность водопотребления сельскохозяйственных культур, площади орошаемых полей. Во всех случаях начало полива необходимо предусматривать при снижении содержания влаги в почве на конце окружности движения машины до 75-80% НВ.

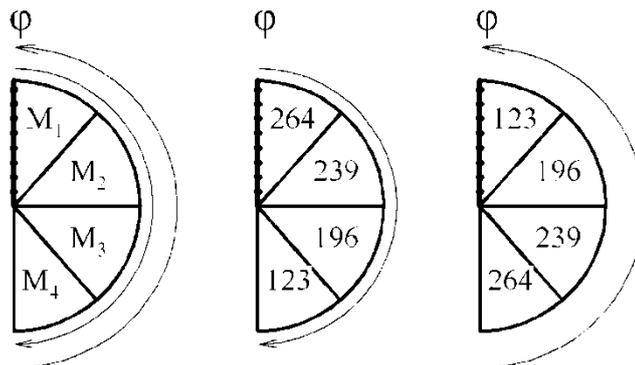


Рисунок 4.4 – Оптимизация выдачи поливной нормы при делении на 4 сектора

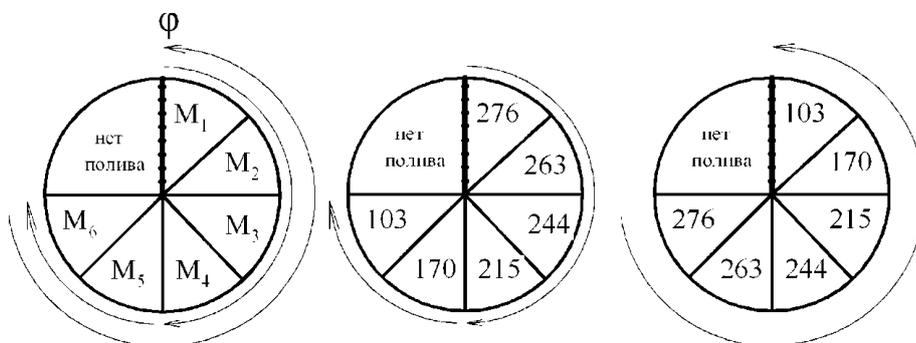


Рисунок 4.5 – Оптимизация выдачи поливной нормы при делении на 6 участков

Рассмотрим технологические схемы работы дождевальной машины при поливе с разными поливными нормами и временем перемещения на участках, рис. 4.6. Причинами этому могут быть разные культуры, различия в свойствах почв или рельефа, требующие применения разного полива.

Реверсирование применяется на поливе культур на почвах тяжелого механического состава и высоким уровнем грунтовых вод, где орошение производится за несколько приемов, а также в случае невозможности поливать полный круг, в частности при ограничении орошаемого поля дорогами, наземными трубопроводами и др. Культура наиболее раннего сева должна размещаться возле парковочного положения машины.

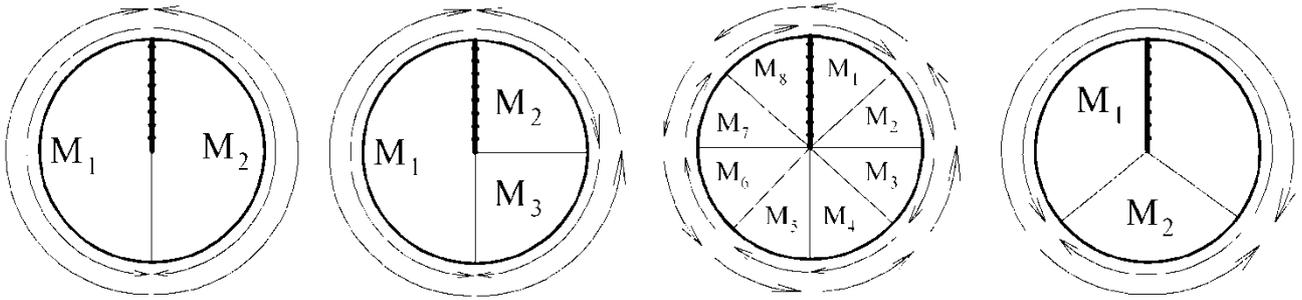


Рисунок 4.6– Технологические схемы полива

Рассмотрим несколько поливов ДМ последовательно при движении по часовой стрелке (рис. 4.7).

Скорректируем режим движения дождевальная машины от начального участка поля к конечному, таким образом, чтобы поливная норма изменялась на величину затрат на водопотребление с учетом времени осуществления поливов.

Допустим, машина длиной L_M осуществляет полив начальной поливной нормой M , $m^3/га$. Разобьем поле на четыре равных сектора, на каждом из которых зададим средние значения времени, нормы полива и скорости движения машины.

Время, в течение которого будет полит сектор определится как:

$$Q_{MtC} = MS_{CEK}, \quad (4.38)$$

где Q_M – расход дождевальная машины, $m^3/ч$;

t_C – время полива сектора, ч;

S_{CEK} – площадь полива сектора, га.

Время полива сектора, ч

$$t_C = \frac{S_{CEK} M}{Q_M} = 0,5 \frac{l_{CEK} R_M M}{Q_M}. \quad (4.39)$$

Скорость движения последней тележки по сектору с учетом буксования, м/мин:

$$V_{CP.CEK} = \frac{\beta_T l_{CEK}}{60 t_C}, \quad (4.40)$$

β_T – коэффициент буксования.

Рассмотрим первый круг полива. При прохождении первого сектора в точке Б необходимое количество влаги W_1 , $m^3/га$ [74]:

$$W_1 = M + E_1 t_{C1}, \quad (4.41)$$

где E_1 – среднечасовое водопотребление в первом секторе;

t_{C1} – среднее время полива первого сектора, ч.

Поливная норма в первом секторе:

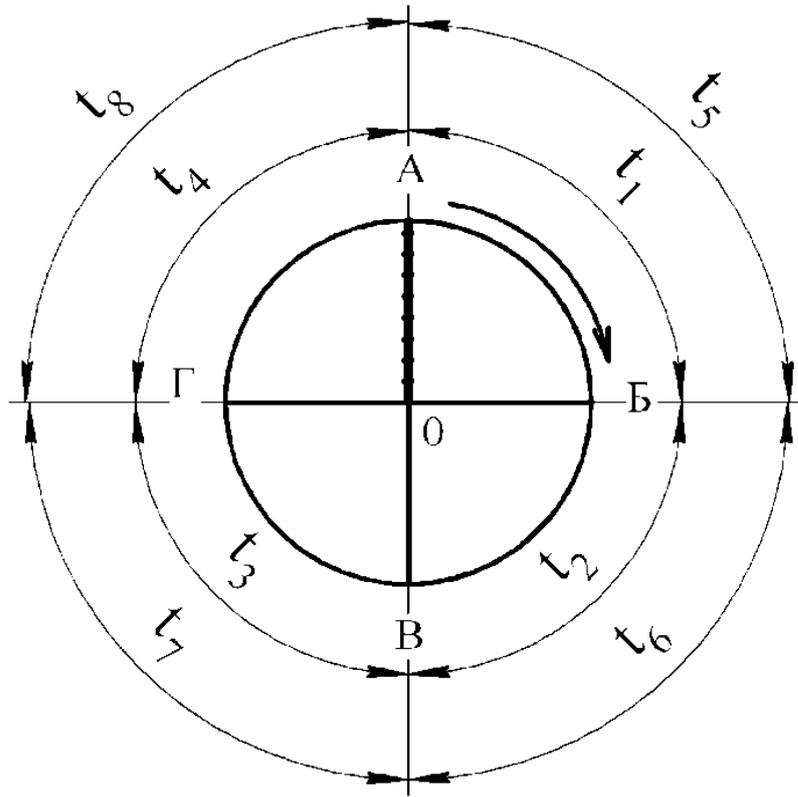


Рисунок 4.7 – Схема полива при изменении поливной нормы

Поливная норма в первом секторе:

$$M_1 = \frac{Q_M t_{c1}}{S_{\text{CEK}}} = \frac{2Q_M t_{c1}}{\ell_{\text{CEK}} R_M}, \quad (4.42)$$

Приравняв необходимое количество влаги к норме полива первого сектора, преобразовав уравнение, с учетом выражения (4.38) получим значение времени полива в первом секторе:

$$t_{c1} = \frac{0,5 \ell_{\text{CEK}} R_M M}{Q_M - 0,5 \ell_{\text{CEK}} R_M E_1}. \quad (4.43)$$

Рассмотрим полив второго сектора, определим необходимое количество влаги W_2 , $\text{м}^3/\text{га}$, в точке В:

$$W_2 = M + E_1 t_{c1} + E_2 t_{c2}, \quad (4.44)$$

где E_2 – среднечасовое водопотребление на втором секторе, $\text{м}^3/\text{га}$;

t_{c2} – среднее время полива второго сектора, ч.

При этом поливная норма

$$M_2 = \frac{2Q_M t_{c2}}{\ell_{\text{CEK}} R_M}, \quad (4.45)$$

Среднее время полива второго сектора

$$t_{c2} = \frac{0,5 \ell_{\text{CEK}} R_M (M + E_1 t_{c1})}{Q_M - 0,5 \ell_{\text{CEK}} R_M E_2}, \quad (4.46)$$

Для третьего сектора:

$$W_3 = M + E_1 t_{C1} + E_2 t_{C2} + E_3 t_{C3}, \quad (4.47)$$

где E_3 – среднечасовое водопотребление третьего сектора, $m^3/га$;

t_{C3} – среднее время полива третьего сектора, ч.

При этом поливная норма

$$M_3 = \frac{2Q_M t_{C3}}{l_{CEK} R_M}. \quad (4.48)$$

Среднее время полива третьего сектора

$$t_{C3} = \frac{0,5 l_{CEK} R_M (M + E_1 t_{C1} + E_2 t_{C2})}{Q_M - 0,5 l_{CEK} R_M E_3}. \quad (4.49)$$

Соответственно для четвертого сектора:

$$W_4 = M + E_1 t_{C1} + E_2 t_{C2} + E_3 t_{C3} + E_4 t_{C4}, \quad (4.50)$$

где E_4 – среднечасовое водопотребление четвертого сектора, $m^3/га$;

t_{C4} – среднее время полива четвертого сектора, ч.

Поливная норма:
$$M_4 = \frac{2Q_M t_{C4}}{l_{CEK} R_M}. \quad (4.51)$$

Среднее время полива четвертого сектора

$$t_{C4} = \frac{0,5 l_{CEK} R_M (M + E_1 t_{C1} + E_2 t_{C2} + E_3 t_{C3})}{Q_M - 0,5 l_{CEK} R_M E_4}. \quad (4.52)$$

Рассмотрим второй полив круга.

$$W^{(2)}_1 = M - E_1 t_{C1} + E_5 t_{C5}, \quad (4.53)$$

где E_5 – среднечасовое водопотребление первого сектора при втором поливе, $m^3/га$;

t_{C5} – среднее время полива первого сектора при втором поливе, ч.

При этом поливная норма

$$M_5 = \frac{2Q_M t_{C5}}{l_{CEK} R_M}. \quad (4.54)$$

Среднее время полива первого сектора при втором поливе

$$t_{C5} = \frac{0,5 l_{CEK} R_M (M - E_1 t_{C1})}{Q_M - 0,5 l_{CEK} R_M E_5}. \quad (4.55)$$

Средняя скорость движения дождевальная машины по данному участку

Для второго сектора:

$$W^{(2)}_2 = M - E_1 t_{C1} - E_2 t_{C2} + E_5 t_{C5} + E_6 t_{C6}, \quad (4.56)$$

где E_6 – среднечасовое водопотребление на втором секторе при втором поливе, $m^3/га$;

t_{C6} – среднее время полива второго сектора при втором поливе, ч.

При этом поливная норма

$$M_6 = \frac{2Q_M t_{C6}}{l_{CEK} R_M}. \quad (4.57)$$

Среднее время второго полива на втором участке

$$t_{C6} = \frac{0,5l_{CEK} R_M (M - E_2 t_{C2} - E_1 t_{C1} + E_5 t_{C5})}{Q_M - 0,5l_{CEK} R_M E_6}. \quad (4.58)$$

Второй полив на третьем участке:

$$W^{(2)}_3 = M - E_3 t_{C3} - E_2 t_{C2} - E_1 t_{C1} + E_5 t_{C5} + E_6 t_{C6} + E_7 t_{C7}, \quad (4.59)$$

где E_7 – среднечасовое водопотребление на третьем секторе при втором поливе, м³/га;

t_{CEK7} – среднее время полива сектора три при втором поливе, ч.

При этом поливная норма

$$M_7 = \frac{2Q_M t_{C7}}{l_{CEK} R_M}. \quad (4.60)$$

Среднее время полива на третьем секторе при втором поливе

$$t_{C7} = \frac{0,5l_{CEK} R_M (M - E_3 t_{C3} - E_2 t_{C2} - E_1 t_{C1} + E_5 t_{C5} + E_6 t_{C6})}{Q_M - 0,5l_{CEK} R_M E_7}. \quad (4.61)$$

Второй полив на четвертом участке

$$W^{(2)}_4 = M - E_4 t_{C4} - E_3 t_{C3} - E_2 t_{C2} - E_1 t_{C1} + E_5 t_{C5} + E_6 t_{C6} + E_7 t_{C7} + E_8 t_{C8}. \quad (4.62)$$

$$M_8 = \frac{2Q_M t_{C8}}{l_{CEK} R_M}. \quad (4.63)$$

$$t_{C8} = \frac{0,5l_{CEK} R_M (M - E_4 t_{C4} - E_3 t_{C3} - E_2 t_{C2} - E_1 t_{C1} + E_5 t_{C5} + E_6 t_{C6} + E_7 t_{C7})}{Q_M - 0,5l_{CEK} R_M E_8}. \quad (4.64)$$

Параметры последующих поливов определяются аналогичным образом.

4.2 Планирование поливов при орошении на основе информационно-советующих систем

Основная задача при планировании поливов и задания режима работы машин состоит в оценке влияния основных факторов, определяющих характеристики полива на этапе анализа и разработки рекомендаций. А также факторов, обуславливающих необходимость корректировки режима поливов, анализе информации и принятии решения о внесении изменений в планируемый режим орошения по результатам оперативных метеоданных (рис. 4.8).



Рисунок 4.8 – Схема задания режима работы машины

Оперативное планирование эксплуатационных режимов орошения с использованием математических моделей и компьютерной технологии повышает точность нормирования объемов подачи воды на полив, обеспечивая эффективность и экономию воды и энергоресурсов.

Оперативное управление поливами включают в себя периодическую оценку почвенных влагозапасов в слое активного влагообмена, динамично связанных с видом и фазой развития сельскохозяйственной культуры.

В каждом конкретном случае дефициты водопотребления орошаемых культур необходимо корректировать, используя опытные и расчетные данные (рис. 4.9).

К необходимой текущей ключевой информации следует отнести влажность почвы. К прогнозной: температуру и влажность воздуха, скорость ветра, осадки.



Рисунок 4.9 – Функциональная схема управления поливами

Требуемая информация для контроля: влажность почвы в начале вегетационного периода (через каждые пять дней, декады), контрольные замеры выданных поливных норм и равномерности их распределения по площади и глубине на каждом секторе полива), сбор сведений о состоянии посевов, ходе агротехнических мероприятий. На основании полученных данных – принятие решения о целесообразности и размерах корректировки орошения сельскохозяйственных культур.

Режим работы дождевальной техники должен быть адаптирован к почвенно-климатическим условиям региона, а также содержанию влаги в почве и атмосфере в режиме реального времени, что позволяют возможности современных технических средств, существующих метеостанций, систем автоматизации и управления дождевальными машинами и в той или иной степени используются иностранными производителями дождевальной техники [39-40].

5 КРАТКАЯ МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования дождевальных машин и установок, их параметров и характеристик проводят согласно традиционным методикам, изложенным в СТО АИСТ 11.1-2010 «Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей»; ГОСТ 20915–75 Сельскохозяйственная техника. Методы определения условий испытаний; ГОСТ 23734–98 Тракторы промышленные. Методы испытаний; ГОСТ 26953–86 Техника сельскохозяйственная мобильная. Методы определения воздействия двигателей на почву; СТО АИСТ 001–2010 Агротехническая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения; СТО АИСТ 7.3–2010 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины для транспортирования и внесения жидких удобрений. Методы оценки функциональных показателей и др.

Основная программа экспериментальных исследований включала в себя:

- лабораторные исследования характеристики дождевателей;
- лабораторные исследования гидравлических параметров потока в водопроводящих трубопроводах;
- полевые исследования качественных показателей полива модернизированных и новых образцов ДМ кругового действия, оборудованных разработанными низконапорными дождевателями;
- полевые исследования несущих свойств почвы при поливе;
- полевые исследования характеристик работы модернизированных и новых образцов ДМ кругового действия в зависимости от их конструктивного исполнения;
- полевые испытания модернизированных ДМ «Фрегат», оборудованных низконапорными дождевателями и новых образцов ДМ кругового действия ДМ «Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД), ДМ «КАСКАД» для оптимизации режимов работы и разработки рекомендаций.
- сравнение стандартной и альтернативной технологии полива дождевальной машиной;
- определение характеристик полива при работе ДМ на склонах.

Лабораторная установка и оборудование для определения качественных показателей работы дождевателей

Испытательный стенд состоит из стойки 1 с закрепленным спускным трубопроводом 2 и установленными сменными дождевателями 3. Вода подается в напорный трубопровод центробежным насосом 4 через расходомер 5 (рис.5.1-5.2). Давление устанавливается регулировочным краном 6 и измеряется манометром 7. Мерные емкости 7 размещаются по лучам радиусов полива с интервалом 0,5 м и углом 10-15°. Гибкий спускной трубопровод имеет возможность перемещения в вертикальной плоскости для регулирования расстояния дождевателя над поверхностью земли [29].

Лабораторная установка и оборудование для определения характеристик потока в водопроводящих трубопроводах

Лабораторная установка включает в себя: 1 – напорный бак, 2 – сменные трубы разного диаметра с перфорацией, 3 – пьезометры (больше 0,1МПа–манометры); 4 – мерный бак; 5 – сливной бак; 6 – насосная установка (рис. 5.3-5.4).

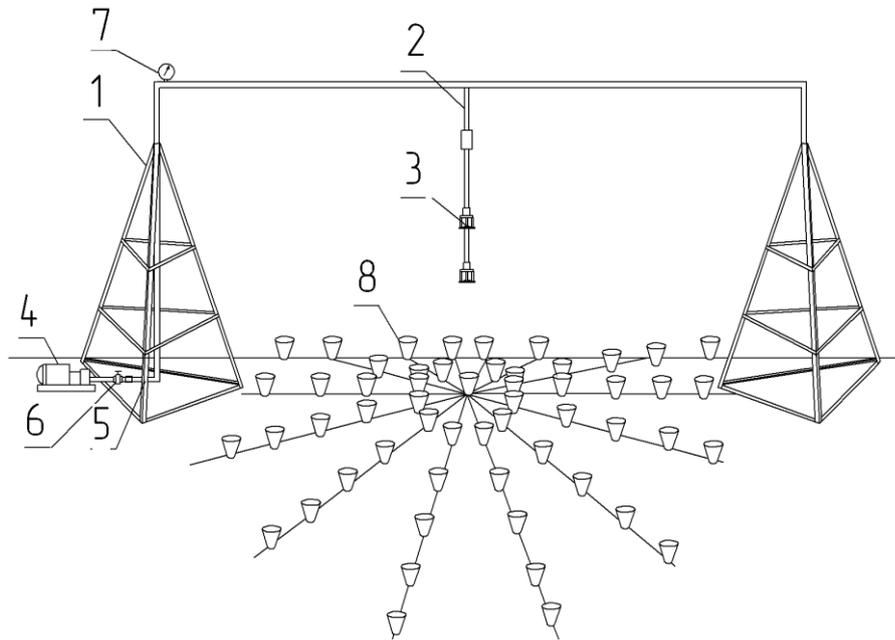


Рисунок 5.1 – Схема стенда для испытаний дождевателей



Рисунок 5.2 – Стенд для испытаний дождевателей

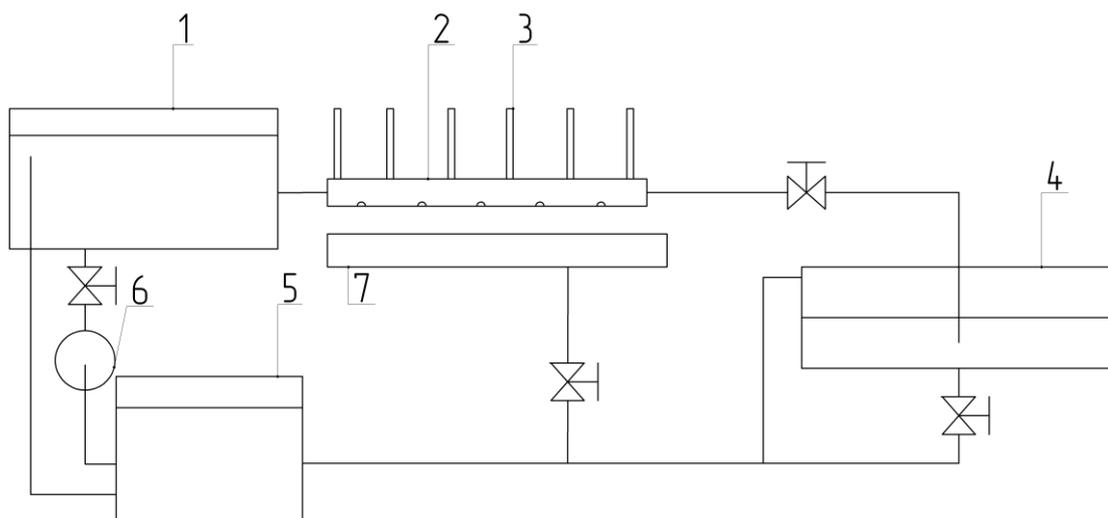


Рисунок 5.3 – Схема установки для определения характеристик потока



Рисунок 5.4 – Лабораторная установка для определения характеристик потока

Лабораторные установки и оборудование для определения функционирования системы автоматики машины

Для проверки и испытания щита управления ЩУ-001.2, приборов управления и контроля прямолинейности ПСЛ 1...10 дождевальная машины кругового действия были использованы лабораторные приборы – имитаторы ЛП-01.1, ЛП-01.2, ЛП-01.3 и ЛП-01.4 (рис. 5.5-5.6).

С их помощью в лабораторных условиях проверялась работоспособность всех элементов автоматики и схемы соединения. Они обеспечивали подачу входных сигналов на контакты устройств управления от тумблеров с панели управления имитатора. Обеспечивали визуальную проверку срабатывания реле устройств защиты по индикации их состояния при помощи светодиодов на панели управления. Программное обеспечение OWEN Logic.



Рисунок 5.5 – Лабораторные приборы для проверки и испытания системы автоматизации и управления

Установка изготовления и подбора конструктивных размеров ходовой тележки

Установка для упрощения процесса изготовления металлоконструкции ходовой тележки и подбора углов установки стоек для обеспечения конструктивно-высотных размеров включает в себя основную балку, угловые рамы для пространственной ориентации опорных стоек (рис. 5.7). На основной балке смонтированы шаблоны для установки колесных редукторов и мотор-редуктора и для направления режущего инструмента при получении отверстий.

Установка для изготовления секций водопроводящего трубопровода, поддержания размеров, точного пространственного позиционирования креплений, фланцев и расположения водоотводов и других параметров пролета (рис. 5.8).



Рисунок 5.6 – Лабораторные приборы для настройки ПСЛ



Рисунок 5.7 – Экспериментальная установка для изготовления и подбора конструктивных размеров ходовой тележки

Установка изготовления и подбора конструктивных размеров водопроводящего трубопровода

Включает в себя основную балку, на которой смонтированы фиксаторы трубы и шаблоны для разметки отверстий и приваривания водоотводов под дождеобразующие устройства и установки и приваривания креплений.

Основные характеристики ДМ «КАСКАД» при проведении полевых исследований представлены в таблице 5.1, 3.1 [29].

Таблица 5.1 – Основные технические характеристики машин «КАСКАД»

Наименование показателей	Значение	
Длина пролета, м	59,5	65,2
Количество опорных тележек	8	6
Длина машины, м	497,5	434
Расстояние от поверхности земли до нижнего пояса металлоконструкции, м	2,8±0,3	2,9±0,3
Давление воды на входе в машину МПа	0,30-0,43	0,35-0,4
Номинальные размеры поперечных сечений труб ферм и консоли, мм	159	
Расстановка дождевателей	Через 3,5 м	Через 4,5 м



Рисунок 5.8 – Экспериментальная установка для изготовления и подбора конструктивных размеров водопроводящего трубопровода

Технические характеристики ДМ «Кубань-ЛК1» при проведении полевых исследований представлены в таблице 5.2 [29].

Таблица 5.2 – Основные характеристики ДМ «Кубань-ЛК1»

Показатель	Значение показателя
Марка	«Кубань-ЛК1» МДЭК 212
Привод	Дизель-электрический
Тип дизельного генераторного агрегата	AD10-T400
Мощность двигателя, кВт	6
Расход воды машиной, л/с	16
Минимальное давление на входе в машину, МПа	0,21
Максимальное давление на входе в машину, МПа	0,4
Тип дождевателей	1 исполнение 1(металлические оцинкованные с гладким дефлектором)
Скорость движения машины, м/мин	0,1-1,8
Длина машины, м;	212
Количество передвижных опор, шт	4
Количество дождевателей	58
Длина пролета, м	48,7
Колеса опорных тележек: -тип -количество	Пневматические камерные по два на тележку Ф148 16-20
Расположение органов оперативного управления	-щит управления на неподвижной опоре
Режим работы машины	Непрерывный, старт-стопный – движение с поливом – движение без полива

Схемы расстановки дождевателей

Для исследований ресурсосберегающих технологий полива ДМ кругового действия были оснащены по следующим схемам расстановки дождевателей [29]:

1. Установка через 5 и 6 м на 25 и 30-метровых пролетах при напоре на входе в машину 0,34 МПа, для машин марки «Фрегат» ДМУ-Б 463-90 дождевателей типа 1 (стальные оцинкованный с гладким дефлектором).

2. Установка через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,2-0,4 МПа ДМ «Кубань-ЛК1» модели 212 дождевателей типа 1 (стальные оцинкованный с гладким дефлектором).

3. Установка через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,35 МПа ДМ «КАС-КАД» модели 497-90 дождевателями типа 2 исполнения 2 (из полиамида, дефлектор с канавками треугольной формы).

4. Установка через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,3 МПа ДМ «КАС-КАД» модели 497-90 дождевателей исполнения 1 типа 2 до 1/2 водопроводящего пояса (с гладкими дефлекторами) и типа 2 исполнения 5 (из полиамида с вращающимися дефлекторами и полукруглыми канавками) с 1/2 водопроводящего пояса.

5. Установка через 4,5 м при напоре на входе в машину 0,35 МПа ДМ «КАС-КАД» длиной 434 м через 4,5 м дождевателей типа 2 исполнения 2 (дефлекторы с канавками) до 2/3 длины водопроводящего трубопровода и дождевателей типа 2 исполнения 6 (из полиамида с двумя дефлекторами) с 2/3 водопроводящего трубопровода.

6. Установка по учащенной схеме через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,35-0,43 МПа ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) длиной 441,5 м дождевателей типа 1 исполнения 1 (стальные оцинкованный с дефлектором гладким).

Основные характеристики ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) при проведении приемочных и сертификационных испытаний представлены в таблице 5.3 [29], рис. 5.9-5.10.

Таблица 5.3 – Основные характеристики ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) при проведении приемочных и сертификационных испытаний

Показатель	Значение показателя по:	
	ТУ	Данным испытаний
1	2	3
Тип машины	Колесная, многоопорная, электрифицированная, кругового действия, с забором воды от закрытой оросительной сети или скважины	
Марка	«Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)	
Привод	Дизель-электрический	
Тип дизельного генераторного агрегата	AD10-T400	
Мощность двигателя, кВт	10	10
Расход воды машиной, л/с	До 90	72,5

Давление, МПа в начале водопроводящего трубопровода в конце водопроводящего трубопровода	0,43	0,43 0,29
Скорость движения машины, м/час	До 110	10,0
Длина машины, м;	До 497,5	441,5
Количество передвижных опор, шт	До 10	9
Диаметр трубопровода, мм	159	159
Высота расположения дождевальных аппаратов над поверхностью земли, мм		1600
Количество концевых аппаратов, шт		1
Марка концевого разбрызгивателя	Idromeccanica Rossi R25S	
Диаметр сопла концевого аппарата, мм	16	
Обслуживающий персонал, чел	1	
Рабочее напряжение системы, В	380	380
Управляющее напряжение системы, В	230	230
Количество карданных передач		18
Количество редукторов, шт		18
Количество эл. двигателей, шт		9
Ширина колеи между двумя пере- движными опорами, м	48,7	48,9
Трудоемкость досборки, чел.-ч		210
Дорожный просвет, не менее, мм	450	460
Колеса опорных тележек: -тип -марка Мотор-редукторы опорных тележек Колесные редукторы	Пневматические камерные Ф148 18.4-24 РЧМ-00 червячные	Пневматиче- ские камерные Ф 148 18.4-24 РЧМ-00 червячные
Расположение органов оперативного управления	-дистанционный пульт управления внешней оросительной системой -щит управления на неподвижной опоре	



Рисунок 5.9 – ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)

Методика определения коэффициента гидравлического трения

Коэффициент гидравлического трения трубопроводов с отводами выше, чем в случае гладких трубопроводов [44, 47, 72]. Для подтверждения теоретических исследований проведены эксперименты.

Исследования характеристик потока жидкости проводились на стальных водопроводящих трубопроводах 16; 20; 25; 30,0; 48,0; 60 мм с отводами диаметром. Длина трубопроводов изменялась от 2 до 6 м. Для обеспечения различной интенсивности отбора жидкости изменялись следующие условия: расстояния между отверстиями: 0,125; 0,25; 0,5; 1,0 м; диаметры отверстий: 1; 1,5; 3; 5 мм. Давление жидкости в трубопроводе: от 0,06 до 0,35 МПа. При этом числа Рейнольдса изменялись в пределах 1000-100000.

Расход находился объемным способом. Путь расход на измеряемом участке собирался с помощью желоба. Заданный расход в трубопроводе устанавливается задвижкой. Температура воды измерялась термометром.

Расход определялся как:

$$Q=V_{\text{Б}} / t, \tag{5.1}$$

где $V_{\text{Б}}$ – объем мерного бачка; t – время, с.

По показаниям пьезометров (манометров) определялись напоры на каждом метре трубопровода.

Средняя скорость движения жидкости:

$$V_1= Q/\omega, \tag{5.2}$$

ω – площадь сечения трубы.



Рисунок 5.10 – ДМ «КАСКАД». Консоль 24м

По разности показаний пьезометров определялись потери напора по длине трубопровода на участках

$$h_w = \frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2} = \lambda \frac{L_{\text{уч}} V^2}{d 2g} \quad (5.3)$$

$\frac{p_1}{\gamma_1} - \frac{p_2}{\gamma_2}$ – пьезометрический напор для соответствующих сечений потока;

$L_{\text{уч}}$ – длина участка, м;

d – диаметр трубопровода;

λ – коэффициент гидравлического трения по длине.

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_1 d}{\nu}, \quad (5.4)$$

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Транзитный расход определяется как:

$$Q_{\text{ТР}} = V \omega, \quad (5.5)$$

V – скорость транзитного потока в рассматриваемом сечении.

$$Q_n = Q_0 - Q_{\text{ТР}}, \quad (5.6)$$

Q_0 – расход в начале трубопровода, является для каждого опыта постоянной величиной.

Относительная интенсивность отбора жидкости, определяемая как

$$\tau_0 = \frac{Q_{\text{ТР}}}{Q_n}, \quad (5.7)$$

где $\frac{Q_{\text{ТР}}}{Q_n}$ – отношение транзитного расхода к путевому расходу жидкости.

Проведенные эксперименты подтверждают, что при значительных числах Рейнольдса величина коэффициента гидравлического трения в трубопроводах с отводами примерно равна величине коэффициента гидравлического трения при равномерном движении жидкости $\lambda_n \approx \lambda_0$, рис. 5.11 [29].

Параметр дискретности

Экспериментальная установка представляла собой установленные на раме стальные трубопроводы диаметром 20; 30; 48; 63; 159 мм. Длина трубопроводов 6 м, разделенные на участки по одному метру с отверстиями 1,5; 3; 5; 10; 14 мм, расстояния между отверстиями: 0,25; 0,5; 1,0 м (рис. 5.12).

Давление жидкости в трубопроводе изменялось от 0,06 до 0,35 МПа. Потери напора на участках измерялись манометрами, установленными через 1 м. Путевой и транзитный расход определялся объемным способом. Путевой расход на измеряемом участке собирался с помощью желоба. Транзитный расход регулировался с помощью вентиля.

Сравнение экспериментальных значений с теоретическими по предлагаемой методике дает хорошее совпадение и хорошо согласуется с исследованиями А. А. Федорца [72].

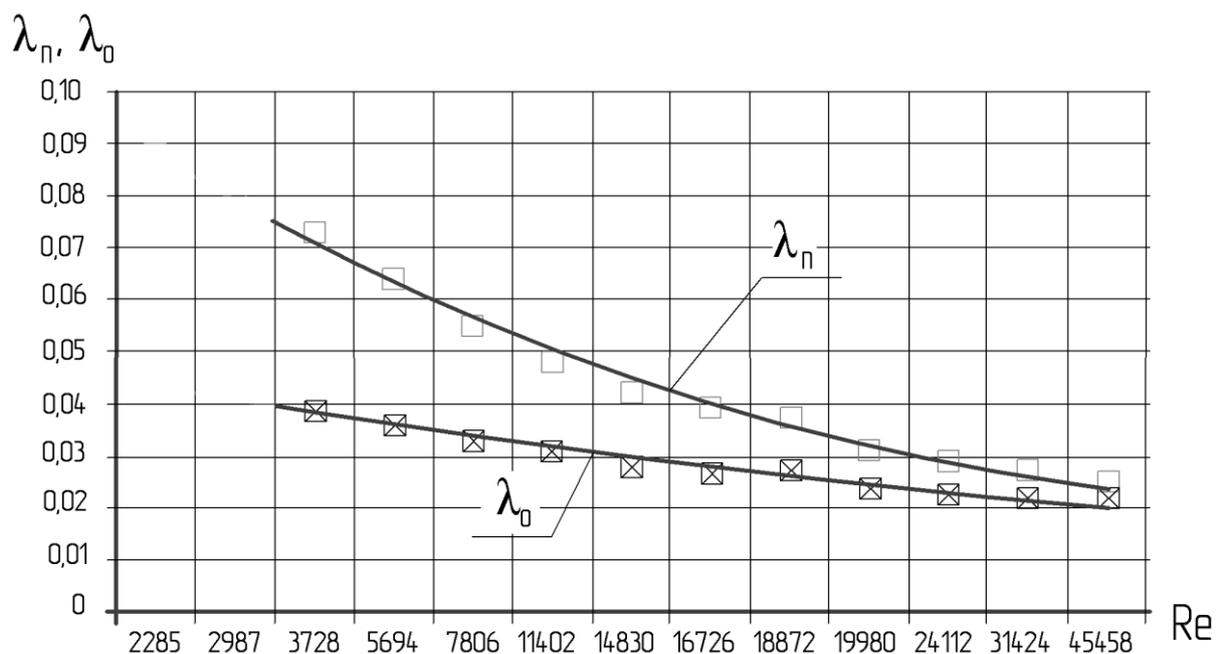


Рисунок 5.11 – Изменения коэффициентов гидравлического трения в трубопроводах с отводами и при равномерном движении воды от числа Рейнольдса: $\lambda_n=3,271Re^{-0,45}$, $R^2=0,982$; $\lambda_0=0,347Re^{-0,26}$, $R^2=0,977$.



Рисунок 5.12 – Экспериментальное определение характеристик потока

Определения характеристик дождевателей

Испытательный стенд представлен на рис. 5.13-5.15. Давление устанавливалось регулировочным краном и замерялось манометром. Мерные емкости размещались по лучам радиусов полива с интервалом 0,5 м и углом 10-15°.

Полное давление на выходе струи из сопла дождевателя измерялось путем ввода трубки Пито в струю на расстоянии 3-5 мм от дождевателя. Трубка устанавливалась отверстием наконечника против движения потока жидкости. На дождеватель устанавливался заборный колпак, из которого вода подавалась в мерный бак емкостью 40 л. Время заполнения мерного бака замерялось секундомером (ГОСТ 1197-70). Для определения максимальной дальности полета струи дождеватель устанавливался на различную высоту от 1,0 до 2,5 м. Максимальная дальность полета струи измерялась от оси установки дождевателя до точки падения последних капель.

Диаметр сопла дождевателя изменялся от 3,0 до 15,0 мм, давление перед гибким спускным трубопроводом – от 0,07 до 0,45 МПа.

Средняя действительная интенсивность $\rho_{\text{ср}}$, мм/мин определялась делением расхода воды $Q_{\text{н}}$ на мгновенную площадь полива:

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{60Q_{\text{н}}}{\pi R'^2}, \quad (5.8)$$

где $Q_{\text{н}}$ – расход воды, л/с;

R' – радиус захвата дождем, м;

Экспериментальные исследования ДМ оборудованных низконапорными дождевателями

Фактическая средняя норма полива, м³/га, после прохода дождевальной машины определялась по формуле:

$$m_{\text{ф}} = 10 \cdot h_{\text{ос}}, \quad (5.9)$$

где $h_{\text{ос}}$ – средний слой дождя на участке полива, мм.

При определении распределения слоя и интенсивности дождя вдоль трубопровода машины использовались дождемеры с приемной площадью 25 см² и объемом 3 л, которые расставлялись в радиальном направлении в 2...3 ряда с центральным углом 3-5° и интервалом от 1 до 5 м. Объем воды в дождемерах замерялся мензуркой, время полива дождем и время опыта замерялись секундомером (ГОСТ 1197-70) и часами.

Величина потерь на испарение и снос ветром оценивалась по разнице между объемами воды, поданными дождевальными машинами и собранными у поверхности почвы с помощью дождемеров. Для сбора воды с поверхности почвы применялись специальные пробоотборники, представляющие собой воронку, помещенную в стеклянную емкость. С целью снижения испарения воды, собранной в пробоотборники, бутылка оборачивалась в два слоя хлопчатобумажной тканью.



Рисунок 5.13 – Испытание дождевателей

Величину потерь дождя и сноса ветром определяли по формуле [60]:

$$E_{ис} = \frac{m_p - m_{\phi}}{m_{\phi}} \cdot 100\%, \quad (5.10)$$

где m_p , m_{ϕ} – расчетная и фактическая поливная норма, мм.

Фактическая поливная норма определялась при помощи дождемеров и мерной мензурки сразу после полива дождевальной машины.

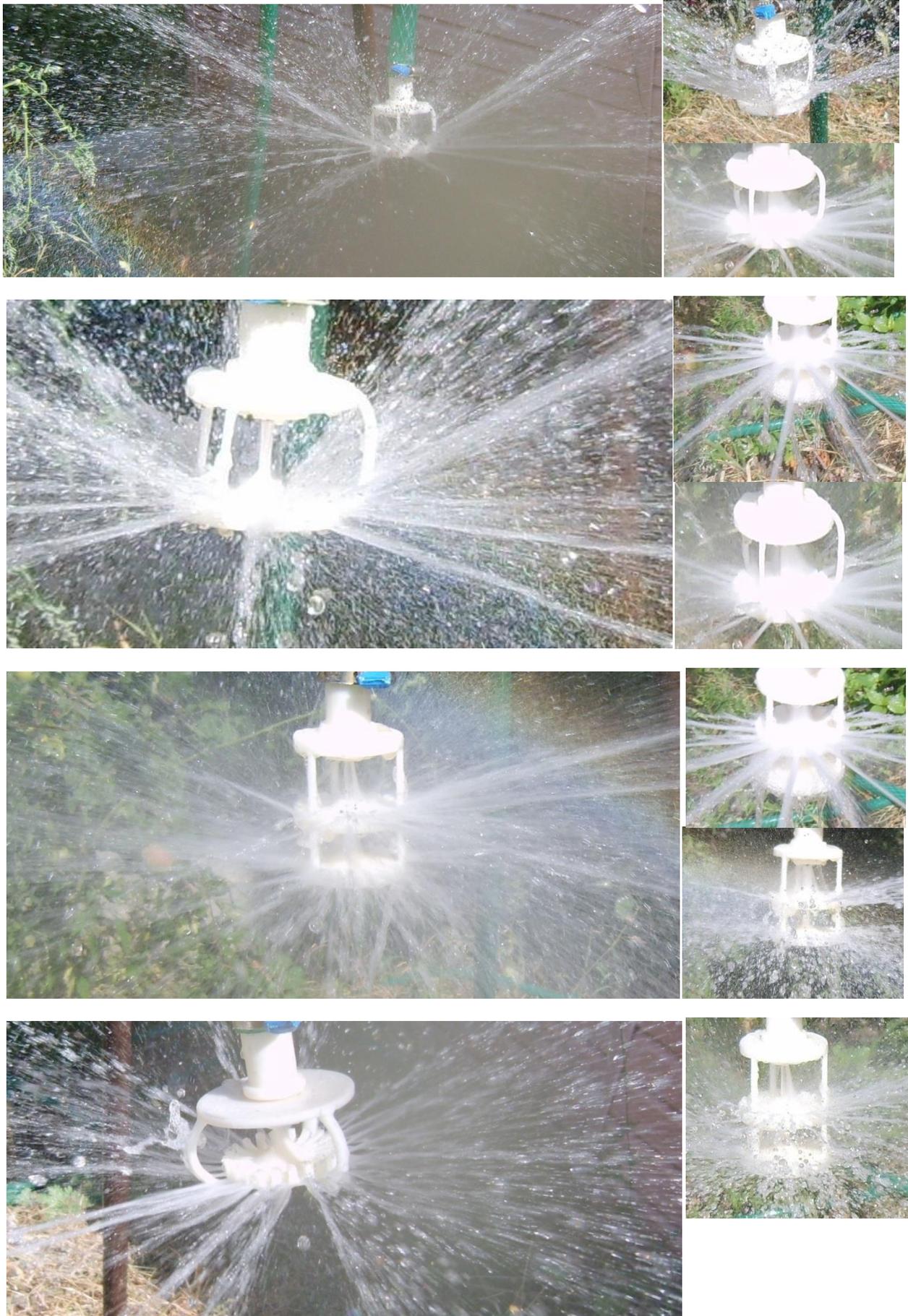


Рисунок 5.14 – Формы дефлектора, режимы и формы сходящего потока



Рисунок. 5.15 – Расстановка дождемеров при лабораторных исследованиях

Фактическая поливная норма определялась при помощи дождемеров и мерной мензурки сразу после полива дождевальными машинами.

Скорость падения капель дождя определялась по методике А.П. Исаева [31] с использованием опытных данных по диаметру капель и высоты их падения.

Среднюю интенсивность определили одним из статистических методов как среднюю арифметическую величину из интенсивностей в точках площади полива с перекрытием и без перекрытия [67].

Влажность почвы определяли до и после поливов в слое 0-100 см через 10 см в трехкратной повторности и рассчитывали по формуле [10]:

$$V_{\text{п}} = \frac{100 \cdot m_{\text{в}}}{m_{\text{сп}}} = 100 \frac{m_{1\text{с}} - m_{0\text{с}}}{m_{0\text{с}} - m_{\text{с}}}, \quad (5.11)$$

где $V_{\text{п}}$ – полевая влажность, %; $m_{\text{в}}$ – масса испарившейся влаги, г; $m_{\text{сп}}$ – масса сухой почвы, г; $m_{\text{с}}$ – масса пустого стаканчика с крышкой, г; $m_{1\text{с}}$ – масса влажного грунта со стаканчиком и крышкой, г; $m_{0\text{с}}$ – масса высушенного грунта со стаканчиком и крышкой, г.

Пробу грунта массой 15 - 50 г для определения влажности отбирали способом квартования, помещали в заранее высушенный, взвешенный и пронумерованный стаканчик и плотно закрывали крышкой. Грунт высушивали до постоянной массы при температуре $(105 \pm 2) ^\circ\text{C}$ в течение 5 ч (рис.5.16) .

Сток воды определялся по общепринятой методике по стоковым площадкам площадью 1000 см^2 . Площадки располагали на повышенных элементах микрорельефа поля с тем, чтобы промачивание почвы осуществлялось только водой, успевающей впитываться в процессе дождевания.

Норма полива до стока в зоне полива дождевателей определялась по моменту образования устойчивых луж на поверхности поля.

Оценка несущих свойств почв от их режима орошения ДМ производилась на различных по типу почвах и механическому составу участках. Для лабораторно-полевых исследований по оценке изменения несущих свойств почв, при их орошении ДМ, применялся ручной почвомер–пенетромтр с конусно-крыльчатым наконечником согласно ГОСТ 19912-2001 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием».

По усилию пенетрации определялось удельное сопротивление сжатию $\sigma_{СЖ}$, Па:

$$\sigma_{СЖ} = P_n / S_K, \quad (5.12)$$

P_n – усилие пенетрации, Н;

S_K – площадь поперечного сечения конуса, м².

Затем вдавливалась крыльчатка и определялось удельное сопротивление срезу τ' :

$$\tau' = M_{МАКС} / k_\tau, \quad (5.13)$$

$M_{МАКС}$ – максимальный внешний момент, Нм;

k_τ – статический момент поверхностей среза (константа крыльчатки).

До и после прохода контрольных сечений производились замеры ручным почвомером-пенетромтр в 10-и кратной повторности по длине пролета показателей несущих и сдвиговых характеристик почвы в сухом и увлажненном ее состоянии. Несущую способность почвы определяли согласно зависимости А.И. Рязанцева [61].

Исследование колееобразования проводилось в начале, середине и конце поливного периода. Замеры глубины колеи проводились с помощью линейки.

Такие показатели как глубина и ширина колеи определялись по длине трубопровода в не менее чем в 3-х контрольных сечениях участка (в начале, середине и конце). При этом из измерений исключались записи грубых местных неровностей (поперечная колея, канава и др).

Оценка конструктивно-высотных свойств проводились на базовых модификациях машин «Фрегат» ДМ-463-90, «Кубань –ЛК1» МДЭК-212, «Кубань-ЛК1М» модели 497-90 с пролетом 48 м и «КАСКАД» с пролетами 59,5 м и 65,2 м, оснащенных низконапорными дождевателями.

Для ДМ «Фрегат» определялся прогиб, затем глубина погружения колес. Далее определяли допустимый агротехнический просвет Н" на ровном рельефе и уменьшение агротехнического просвета. Аналогичным образом до линии трубопровода определялись показатели для ДМ «Кубань».

Скорость движения задавалась со щита управления путём изменения ПВ% (продолжительность включения) электродвигателя последней тележки. Движение остальных тележек машины происходило в старт-стоповом режиме, при этом управление движением каждой тележки осуществлялось автономно прибором синхронизации движения в линию промежуточных тележек 1ПСЛ-П-01-1ПСЛ-П-09.



Рисунок 5.16 – Измерения влажности почвы

Установка задающего таймера производилась заданием в секундах длительностью импульса (И) и паузы (П), соотношение которых определяет

продолжительность включения (ПВ%) электродвигателя крайней опорной тележки в течение цикла в зависимости от требуемой нормы полива

$$\text{ПВ}\% = \frac{И}{И + П} 100\%, \quad (5.14)$$

Для требуемой нормы полива ($m_{\text{тр}}$) при минимальной норме полива по (m_{min}) устанавливалась продолжительность включения:

$$\text{ПВ}\% = \frac{m_{\text{min}}}{m_{\text{тр}}} 100\%, \quad (5.15)$$

Для определения влияния давления воздуха в шинах и нагрузки, приходящейся на ось колеса на сопротивление передвижению и глубину колеи были проведены лабораторные исследования. Исследования проводились в грунтовом канале Саратовского ГАУ.

Грунтовый канал представляет собой сварной короб с насыпанным грунтом, передвигающийся по рельсовому ходу с помощью привода, состоящего из электродвигателя и редуктора, рисунок 5.17. На подвижной горизонтальной части грунтового канала крепится тензометрическое звено, на котором устанавливается конструкция, имитирующая ходовую тележку ДМ, рисунок 5.18



Рисунок 5.17 – Используемые тележки в экспериментах

В процессе передвижения ходовой тележки по грунтовому каналу, со стороны грунта возникают силы, действующие на колесо в трех плоскостях. Данные силы регистрируются тензометрическими датчиками, соединенными по полумостовой схеме, установленными на тензометрическом звене. Был применен тензометрический измерительный комплекс МІС-018 с помощью программного продукта Recorder для регистрации данных сил, а полученный сигнал обрабатывается программой WinПОС.

На разработанной конструкции, имитирующей ходовую тележку ДМ возможна установка различных колес как пневматических, так и жестких разного диаметра, при этом можно их располагать по различным схемам с заданными

параметрами. В процессе проведения лабораторных экспериментов было определено влияние скорости движения колес, внутреннего давления воздуха в шине, нагрузки, приходящейся на ось колеса на глубину колеи, плотность и твердость почвы, сопротивление передвижению колеса.



Рисунок 5.18 – Лабораторные оборудования для проведения экспериментов

В ходе лабораторных исследований нагрузка, приходящаяся на ось пневматического колеса, изменялась в диапазоне от 0,1 кН до 1 кН с интервалом 0,05 кН, что соответствует реальным нагрузкам действующих на колеса ДМ в перерасчете с учетом коэффициента пропорциональности 8,8.

Исследования параметров сцепления пневмошин проводились на специально разработанном экспериментальном стенде согласно рекомендациям Плотникова П.К. Величина вертикальной нагрузки, приходящейся на колесо, составляет 200 кг. Марка шины 14,9-24, 16-20, 18-24. Пригруз осуществляется строительными блоками.

Коэффициенты сцепления μ и сопротивления качению f определялись по методике Плотникова П.К:

$$\mu = \frac{F_{\text{ск}}}{Q} \quad (5.16)$$

$$f = \frac{M_{\text{кач}}}{Q} \quad (5.17)$$

где $F_{\text{ск}}$ – сила трения скольжения, определяемая динамометрическим элементом, и преобразуется в электрический сигнал датчиком

перемещения;

$M_{\text{кач}}$ – момент сил трения качения;

Q – нормальная реакция, равная весу измерительного колеса вместе с силой от нагружателя;

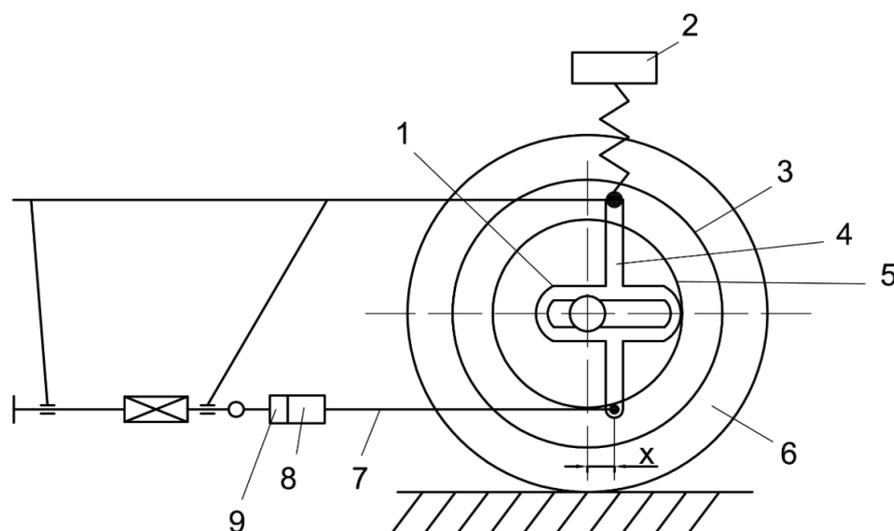


Рисунок 5.19 – Разработанный экспериментальный стенд

1 – вал, 2 – короб нагружатель, 3 – электродвигатель, 4 – двуплечий рычаг, 5 – тахогенератор, 6 – измерительное колесо, 7 – первое звено измерительной тяги, 8 – динамометрический элемент, 9 – датчик перемещения

Измерение производилось с помощью тензометрического комплекса МІС и тензометрического звена.

Норма полива создавалась стационарным дождевателем: 300, 400 и 500 м³/га.

Изменение нагрузки, приходящейся на колесо, обеспечивалось пригрузом.

Обработка результатов экспериментальных исследований и определение статистических характеристик

Для оценки достоверности экспериментальных данных применены методики планирования эксперимента и методы математической статистики [18, 21]. Все экспериментальные значения параметров обрабатывались методами математической статистики. Распределение параметров $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$ характеризовалось:

Средней величиной распределения

$$X = \sum X_i / n_{\text{ИЗМ}}, \quad (5.18)$$

где X_i - результат отдельного измерения;

$n_{\text{ИЗМ}}$ – число измерений.

Дисперсией распределения:

$$D = \frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{n_{\text{ИЗМ}} - 1}; \quad (5.19)$$

Среднеквадратичным отклонением:

$$\sigma_{\text{от}} = D^{0,5}; \quad (5.20)$$

Коэффициентом вариации:

$$\text{КВ} = \frac{100 \cdot \sigma_{\text{от}}}{\bar{X}}; \quad (5.21)$$



Рисунок 5.20 – Щит управления

Точностью опыта:

$$P_{\text{оп}} = \frac{100 \cdot \sigma_{\text{от}}}{\bar{X} \cdot n_{\text{изм}}^{0,5}}. \quad (5.22)$$



Рисунок 5.21– Приборы синхронизации движения в линию промежуточных тележек

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

$$(Y_i - Y_p)^2 = \min, \quad (5.23)$$

где Y_i - фактическое значение зависимого показателя; Y_p - расчетные значения, найденные из уравнения регрессии.

Относительная величина радиуса полива, которому соответствует максимальная величина эпюры распределения дождя, определяется по формуле:

$$\left(\frac{X_i}{R} \right)_{\text{max}} = \frac{\gamma - 1}{(\gamma + \eta + 2)}. \quad (5.24)$$

Параметры γ и η связаны со средней величиной X и среднеквадратичной величиной распределения σ_c следующими зависимостями:

$$\eta = [(1 - X)/\sigma_c^2] \cdot [X \cdot (1 - X) - \sigma_c^2], \quad (5.25)$$

$$\gamma = X \cdot \eta / (1 - X). \quad (5.26)$$

Остаточная дисперсия:

$$D_{\text{ост}}^2 = \sum (Y_{\phi} - Y_p)^2 / (N - V_{\phi} - 1), \quad (5.27)$$

где V_{ϕ} - количество факторов.

Оценка адекватности уравнения регрессии осуществлялась по критерию Фишера:

$$F = D^2 / D_{\text{ост}}^2, \quad (5.28)$$

Коэффициент множественной корреляции:

$$R_m = (1 - D_{\text{ост}}^2 / D^2)^{0,5}. \quad (5.29)$$

6 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6.1 Результаты исследований разработанных низконапорных дождевателей

Исследованиями установлено, что при увеличении диаметра сопла с 3 до 15 мм и давления с 0,1 до 0,35 МПа, расход воды дождевателя увеличивается с 0,1 до 4,5 л/с. Среднее значение коэффициента расхода воды для дождевателей принимаем 0,80 при оптимизированных параметрах сопла [63].

Характеристика расход-давление дождевателей показана на графике (рис. 6.1).

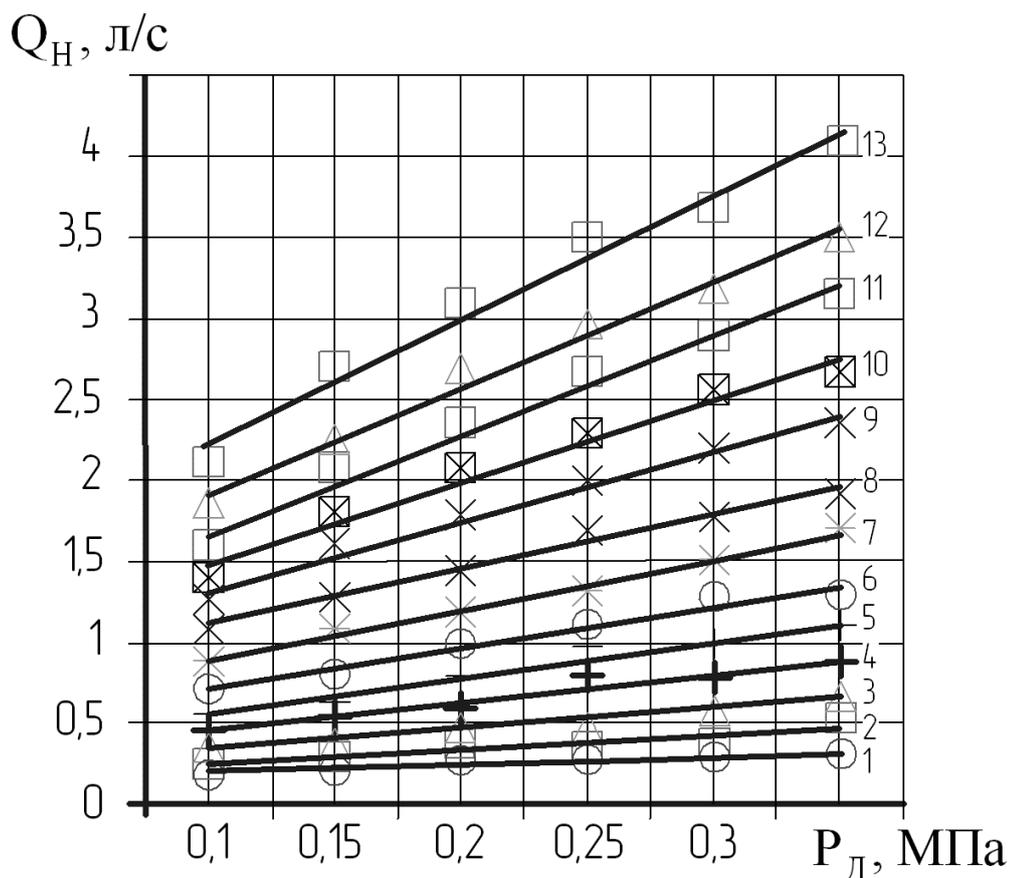


Рисунок 6.1 – Характеристика дождевателей «расход – давление» при различных диаметрах сопла:

- 1 – Ø3 мм, $Q_H=0,485P_D+0,159$, $R^2=0,914$; 2 – Ø4 мм, $Q_H=0,891 P_D+0,176$, $R^2=0,911$;
3 – Ø5 мм, $Q_H=1,24 P_D+0,232$, $R^2=0,976$; 4 – Ø6 мм, $Q_H=1,737 P_D+0,292$, $R^2=0,957$;
5 – Ø7 мм, $Q_H=2,217 P_D+0,354$, $R^2=0,967$; 6 – Ø8 мм, $Q_H=2,514 P_D+0,474$, $R^2=0,973$;
7 – Ø9 мм, $Q_H=3,16 P_D+0,57$, $R^2=0,99$; 8 – Ø10 мм, $Q_H=3,382 P_D+0,785$, $R^2=0,981$;
9 – Ø11 мм, $Q_H=4,314 P_D+0,904$, $R^2=0,988$; 10 – Ø12 мм, $Q_H=5,085 P_D+0,992$, $R^2=0,975$;
11 – Ø13 мм, $Q_H=5,92P_D+1,134$, $R^2=0,982$; 12 – Ø14 мм, $Q_H=6,308 P_D+1,353$, $R^2=0,984$;
13 – Ø15 мм, $Q_H=7,6 P_D+1,493$, $R^2=0,98$.

В результате проведенных лабораторных исследований разработанных дождевателей, было установлено, что радиус захвата дождем зависит в основном от

таких показателей как диаметр сопла, давление перед дождевателем, высота установки над поверхностью поля.

Максимальный радиус захвата дождем при изменении диаметра сопла от 3 до 15 мм при напоре 0,3 МПа составляет 4,5 – 13 м (рис. 6.2-6.4) [63].

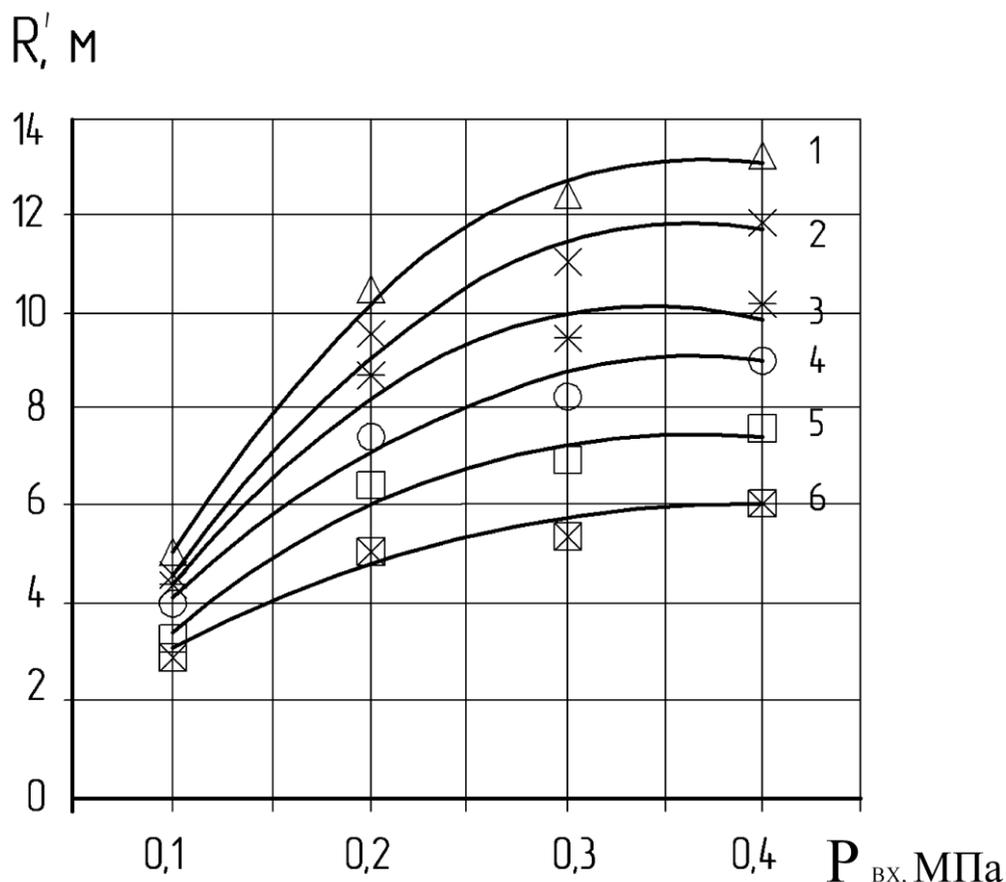


Рисунок 6.2 – Зависимость радиуса от напора для дождевателей для типа 1, исполнения: 1 – Ø8 мм, $R' = -120 P_{вх}^2 + 86,6 P_{вх} - 2,35$, $R^2 = 0,994$; 2 – Ø7 мм, $R' = -107 P_{вх}^2 + 77,45 P_{вх} - 2,125$, $R^2 = 0,987$; 3 – Ø6 мм, $R' = -97,5 P_{вх}^2 + 67,25 P_{вх} - 1,375$, $R^2 = 0,971$; 4 – Ø5 мм, $R' = -70 P_{вх}^2 + 51,2 P_{вх} - 0,3$, $R^2 = 0,981$; 5 – Ø4 мм, $R' = -65 P_{вх}^2 + 44,75 P_{вх} - 0,425$, $R^2 = 0,971$; 6 – Ø3 мм, $R' = -37,5 P_{вх}^2 + 28,45 P_{вх} + 0,625$, $R^2 = 0,966$. Высота установки 2,5 м.

При сравнении радиуса полива дождевателей со стационарным дефлектором и разными по размеру и форме канавками можно сделать вывод, что наибольший радиус полива обеспечивается дождевателями 2 и 3 типа с размерами канавок 3-5 мм шириной и глубиной, в то время как форма канавок при равной площади поперечного сечения и одинаковых остальных параметрах не значительно влияет на характеристики. Однако даже визуально прослеживается увеличение диаметра капель дождя [29, 63].

Статические дефлекторы с мелкими канавками образуют плотные мелкие струи, устойчивые к ветру, обеспечивающие большую дальность и щадящие по отношению к почве и растениям.

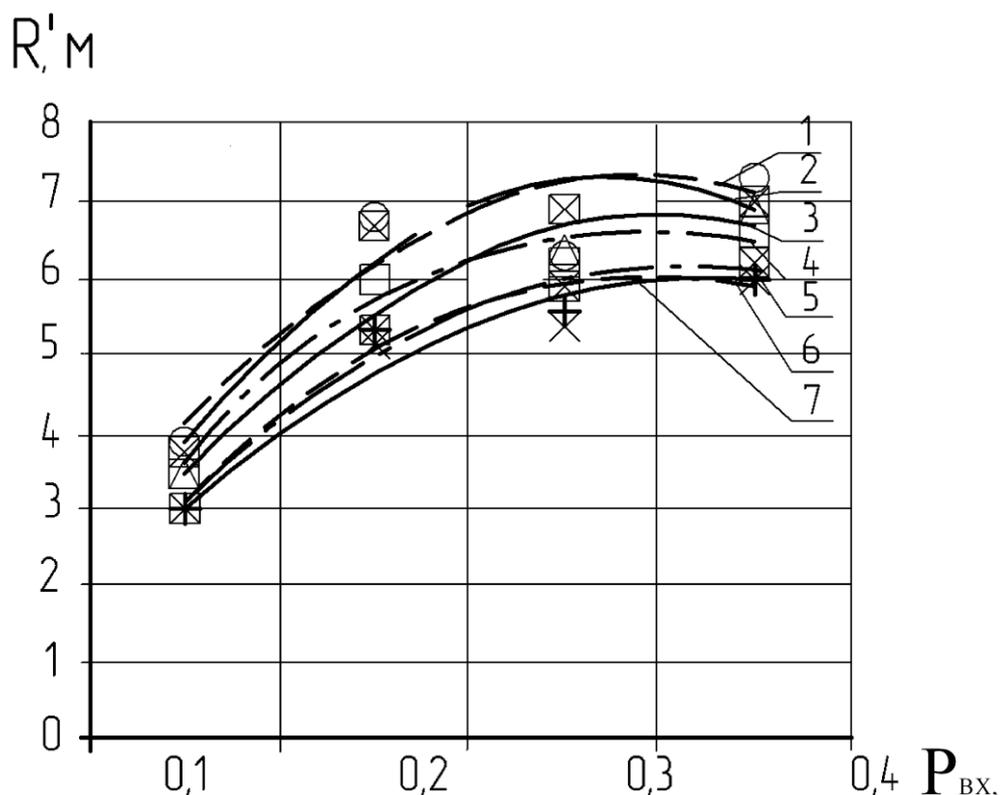


Рисунок 6.3 – Зависимость радиуса от давления для дождевателя с диаметром сопла $\varnothing 3$ мм и стационарным дефлектором на высоте 2,5м:

1 – $R' = -75,5 P_{ВХ}^2 + 38,85 P_{ВХ} + 0,775$, $R^2 = 0,903$ (исполнение 3, ширина 5 мм, глубина 5 мм); 2 – $R' = -70 P_{ВХ}^2 + 44,8 P_{ВХ} + 0,15$, $R^2 = 0,952$ (исполнение 2, ширина 5 мм, глубина 5 мм); 3 – $R' = -52,5 P_{ВХ}^2 + 36,95 P_{ВХ} + 0,375$, $R^2 = 0,942$ (исполнение 2, ширина 3 мм, глубина 3 мм); 4 – $R' = -47,5 P_{ВХ}^2 + 33,65 P_{ВХ} + 0,275$, $R^2 = 0,985$ (исполнение 3, ширина 3мм, глубина 3мм); 5 – $R' = -50 P_{ВХ}^2 + 34,2 P_{ВХ} + 0,2$, $R^2 = 0,947$ (исполнение 2, ширина 1,5 мм, глубина 1,5 мм); 6 – $R' = -47,5 P_{ВХ}^2 + 33,65 P_{ВХ} + 0,275$, $R^2 = 0,985$ (исполнение 3, ширина 1,5 мм, глубина 1,5 мм); 7 – $R' = -37,5 P_{ВХ}^2 + 28,45 P_{ВХ} + 0,625$, $R^2 = 0,966$ (исполнение 1).
 $P_{ВХ}$ в МПа.

Исследования показывают, что при малом давлении порядка 0,05-0,07МПа дождеватели с вращающимся дефлектором обеспечивают меньший радиус полива, чем гладкие стационарные, а повышение характеристик соответствует увеличению давления свыше 0,1 МПа (рис.6.5) [63].

Сравнивая радиус захвата дождевателей со стационарными дефлекторами с гладкой поверхностью и дождевателей с дефлекторами с канавками при равном диаметре сопла можно заметить более высокие значения радиуса у дождевателей с канавками. Однако необходимо оценить качество распыла по диаметрам капель.

Из рисунка 6.6 видно, что для каскадных дождевателей на радиус полива незначительно влияет пропускное отверстие в дефлекторе. Как и для других

дождевателей, для дождевателей каскадного типа, чем больше радиус сопла, тем больше радиус полива.

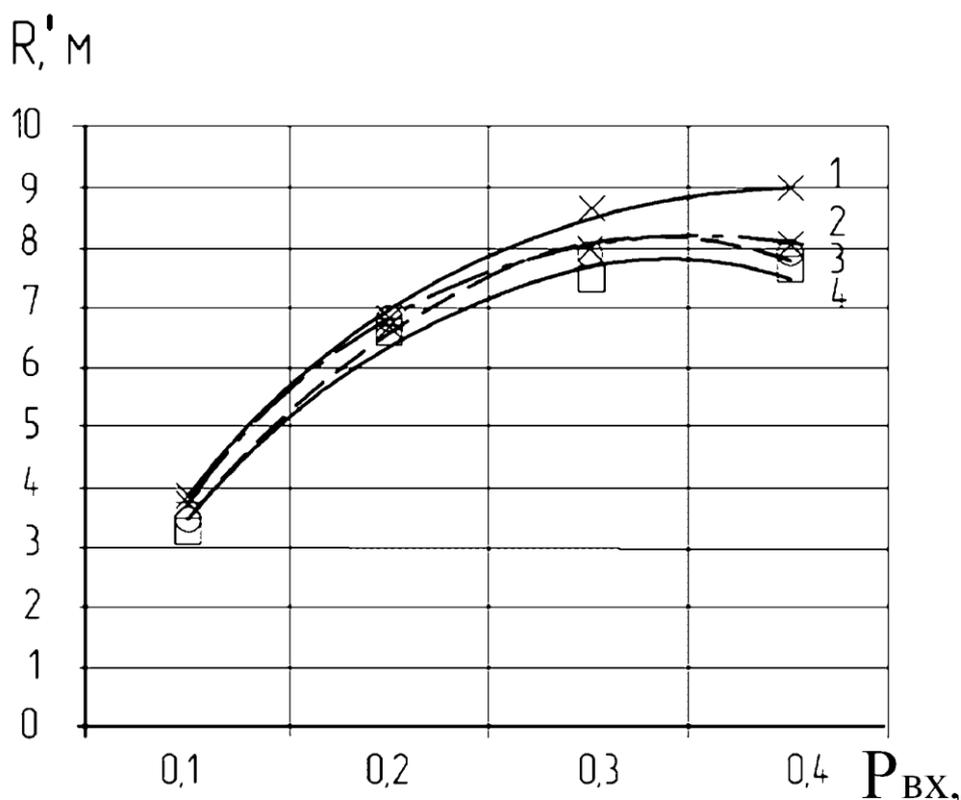


Рисунок 6.4 – Зависимость радиуса полива от давления для дождевателей с вращающимся дефлектором и диаметром сопла 3 мм:

1 – $R' = -90 P_{вх}^2 + 57 P_{вх} - 1,35$, $R^2 = 0,995$ (исполнение 5, ширина 1,5 мм, глубина 1,5 мм); 2 – $R' = -95 P_{вх}^2 + 60,3 P_{вх} - 1,55$, $R^2 = 0,998$ (исполнение 5, ширина 3 мм, глубина 3 мм); 3 – $R' = -77,5 P_{вх}^2 + 52,45 P_{вх} - 0,675$, $R^2 = 0,99$ (исполнение 4, ширина 3 мм, глубина 3 мм); 4 – $R' = -82,5 P_{вх}^2 + 55,95 P_{вх} - 0,925$, $R^2 = 0,99$ (исполнение 5, ширина 5 мм, глубина 5 мм). Высота установки 2,5 м. $P_{вх}$ в МПа.

Анализ опытов для всех типов дождевателей показывает, что повышение давления способствует увеличению дальности полета струи. Также видно, что при повышении давления резко улучшается качество распыла струи и средний диаметр капель уменьшается.

При повышении давления или уменьшении диаметра сопла, улучшается не только распыл струи, но также может увеличиваться равномерность распределения осадков, что требует дополнительных исследований.

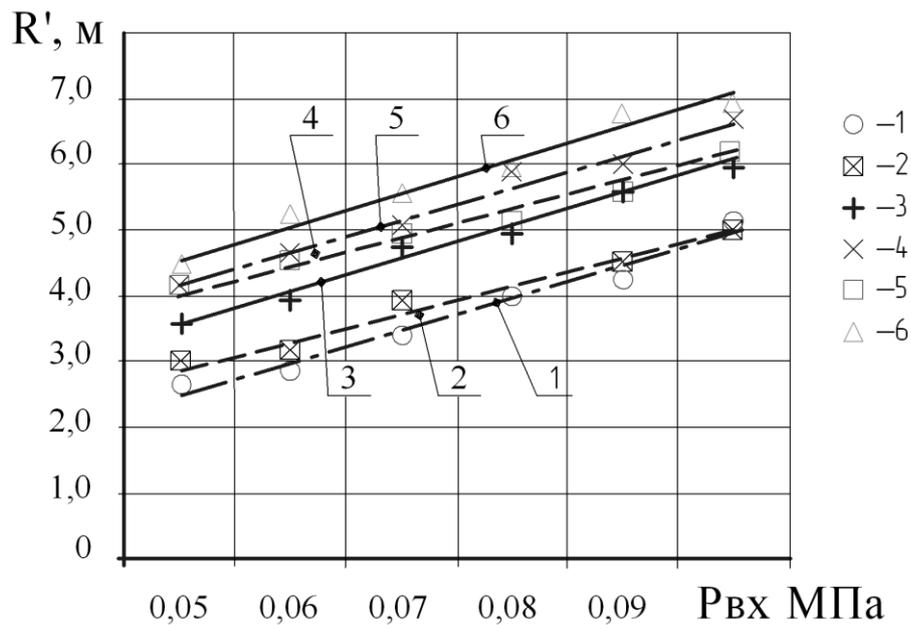


Рисунок 6.5 – Зависимость радиуса от давления для дождевателей: 1 – $R' = 47,71 P_{BX} + 0,138$, $R^2 = 0,960$ (исполнение 4, диаметр сопла $\varnothing 6$ мм); 2 – $R' = 40,85 P_{BX} + 0,819$, $R^2 = 0,984$ (исполнение 1, диаметр сопла $\varnothing 6$ мм); 3 – $R' = 48,85 P_{BX} + 1,152$, $R^2 = 0,992$ (исполнение 4, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм); 4 – $R' = 34,85 P_{BX} + 2,485$, $R^2 = 0,993$ (исполнение 1, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм); 5 – $R' = 48,28 P_{BX} + 1,761$, $R^2 = 0,988$ (исполнение 2, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм); 6 – $R' = 49,71 P_{BX} + 2,103$, $R^2 = 0,989$ (исполнение 1, диаметр сопла $\varnothing 14$ мм).

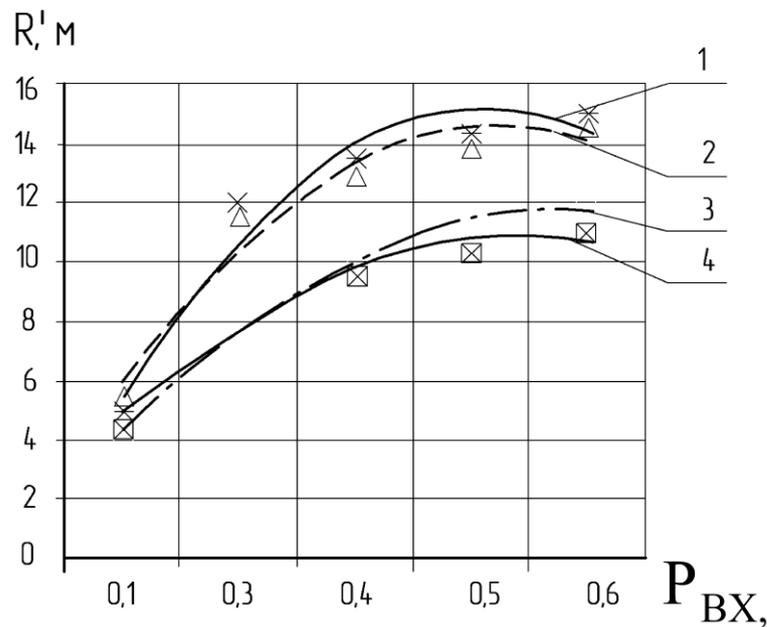


Рисунок 6.6 – Зависимость радиуса от давления для каскадных дождевателей: 1 – $R' = -131,2 P_{BX}^2 + 94,26 P_{BX} - 0,21$, $R^2 = 0,971$ (диаметр сопла $\varnothing 15$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 10$ мм); 2 – $R' = -32,5 P_{BX}^2 + 93,6 P_{BX} - 0,25$, $R^2 = 0,962$ (диаметр сопла $\varnothing 15$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 7$ мм); 3 – $R' = -117,5 P_{BX}^2 + 84,25 P_{BX} - 0,525$, $R^2 = 0,966$ (диаметр сопла $\varnothing 10$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 7$ мм); 4 – $R' = -142,5 P_{BX}^2 + 97,55 P_{BX} - 2,275$, $R^2 = 0,99$ (диаметр сопла $\varnothing 10$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 5$ мм). P_{BX} в МПа.

Интенсивность. Распределение интенсивности дождя вдоль радиуса захвата дождем

Средняя интенсивность $\rho_{\text{ср}}$ дождя изменяется в границах от 0,08 до 1,2 мм/мин; мгновенная интенсивность $\rho_{\text{мг}}$ изменяется – от 0,08 до 1,1 мм/мин [29, 63].

Анализ полученных результатов показывает, что при малых расходах до 0,5 л/с дождеватели с гладким дефлектором занимают промежуточное положение. Меньшая средняя и мгновенная интенсивность соответствует дождевателям 2 и 3 исполнения со статическим дефлектором с канавками 1,5-3 мм. Дождеватели исполнения 4 и 5 с вращающимся дефлектором на малых расходах до 1,5 л/с обеспечивают интенсивность в пределах нормы, несколько большую, чем статические (рис. 6.7-6.8).

При больших расходах дождеватели, имеющие вращающиеся дефлекторы, обеспечивают меньшее значение интенсивности, нежели дождеватели со статическими дефлекторами (рис. 6.8). Дождеватели со статическими дефлекторами с большими канавками также имеют большую интенсивность по сравнению с дождевателями с гладкими дефлекторами.

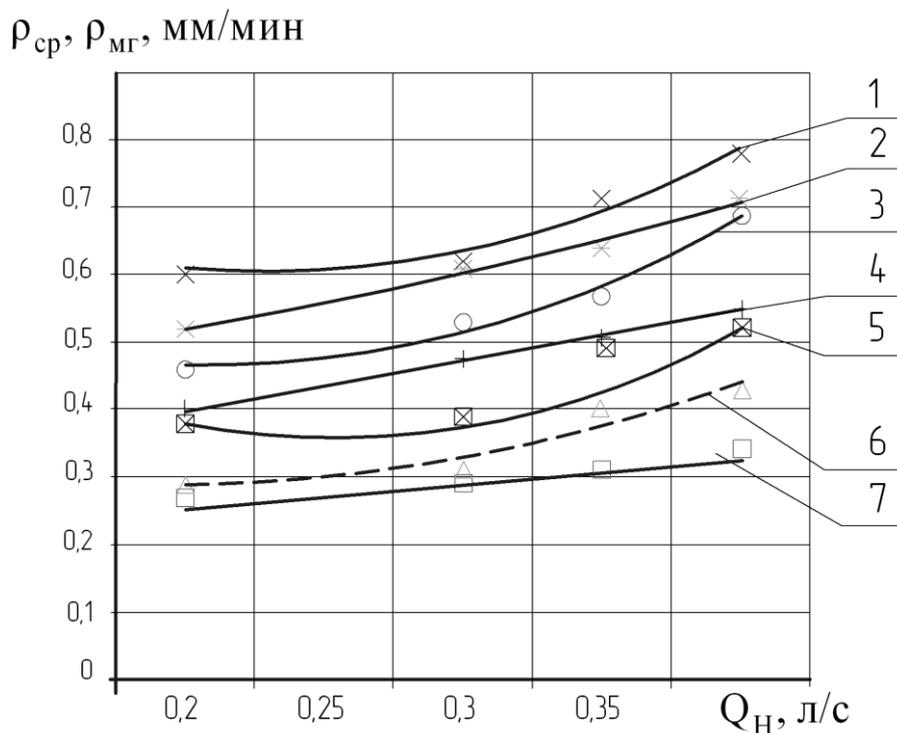


Рисунок 6.7 – Средняя ($\rho_{\text{ср}}$) и мгновенная ($\rho_{\text{мг}}$) интенсивность дождя

при поливе дождевателями в зависимости от расхода дождевателя, диаметр сопла $\varnothing 3$ мм: 1 – $\rho_{\text{сред}} = 6,454 Q_{\text{н}}^2 - 2,980 Q_{\text{н}} + 0,945$, $R^2 = 0,975$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм); 2 – $\rho_{\text{мгн}} = 0,914 Q_{\text{н}} + 0,334$, $R^2 = 0,983$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм); 3 – $\rho_{\text{ср}} = 5,545 Q_{\text{н}}^2 - 2,219 Q_{\text{н}} + 0,684$, $R^2 = 0,982$ (исполнение 4 и 5, канавки 1,5-2 мм); 4 – $\rho_{\text{мгн}} = 0,742 Q_{\text{н}} + 0,252$, $R^2 = 0,997$ (исполнение 4 и 5, канавками 1,5 мм); 5 – $\rho_{\text{мг}} = 7,454 Q_{\text{н}}^2 - 3,830 Q_{\text{н}} + 0,850$, $R^2 = 0,927$ (исполнение 1); 6 – $\rho_{\text{ср}} = 0,737 Q_{\text{н}} + 0,127$, $R^2 = 0,856$ (исполнение 4, канавками 1,5); 7 – $\rho_{\text{мгн}} = 0,337 Q_{\text{н}} + 0,197$, $R^2 = 0,92$ (исполнение 4, канавками 1,5 мм)

При дальнейшем увеличении расхода (рис. 6.9) свыше 2 л/с средняя интенсивность также находится в нормируемых границах, при этом наилучшими показателями обладают дождеватели с вращающимся дефлектором и дождеватели со стационарным дефлектором с мелкими канавками.

При помощи каскадных (двойных) дефлекторов можно распределять значительные расходы воды в нормативных границах интенсивности, обеспечивая мягкий режим орошения.

Конструкция с двумя дефлекторами снижает интенсивность орошения на 10-15% по сравнению с конструкцией с одним дефлектором при одинаковом расходе воды [29].

Интенсивность полива снижается при увеличении площади полива и разделении потока через дождеватель на большее количество струй.

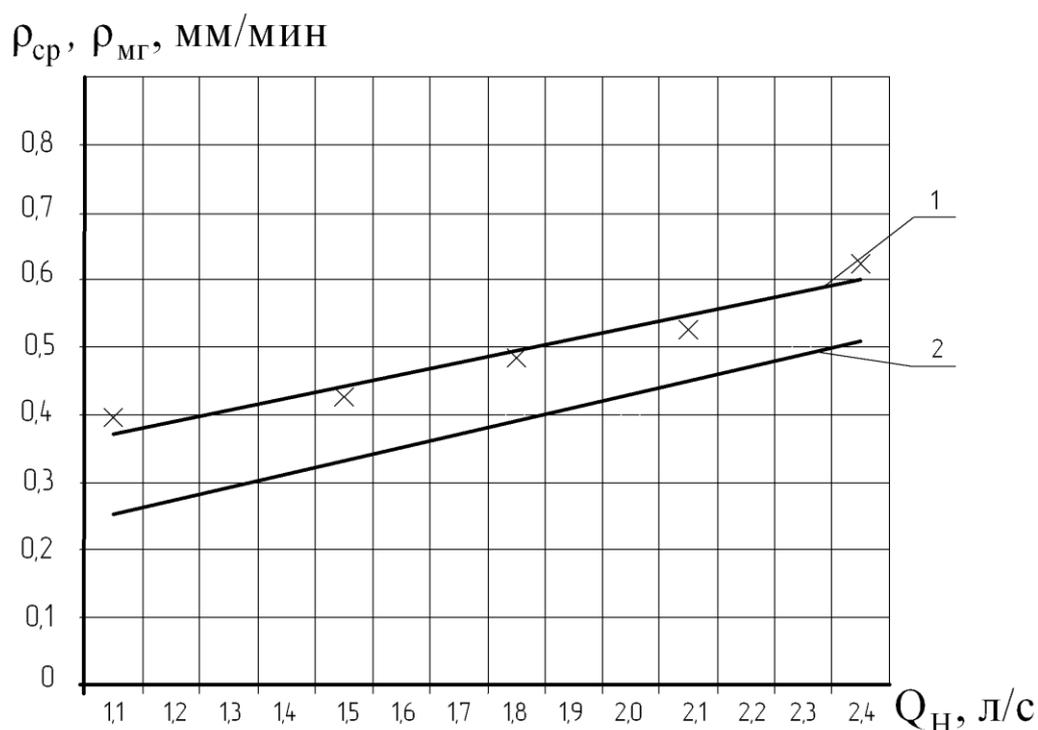


Рисунок 6.8 – Зависимость средней ($\rho_{ср}$) и мгновенной ($\rho_{мг}$) интенсивности дождя от расхода при поливе дождевателями с диаметром сопла $\text{Ø}10$ мм:

1 – $\rho_{ср} = 0,194 Q_{Н} + 0,310$, $R^2 = 0,980$ (исполнение 2 и 3, канавки 3 мм); 2 – $\rho_{ср} = 0,172 Q_{Н} + 0,258$, $R^2 = 0,937$ (исполнение 1); 3 – $\rho_{ср} = 0,201 Q_{Н} + 0,129$, $R^2 = 0,988$ (исполнение 4 и 5 канавки 5-6 мм); 4 – $\rho_{мг} = 0,207 Q_{Н} + 0,076$, $R^2 = 0,954$ (исполнение 2 и 3, канавки 3 мм); 5 – $\rho_{мг} = 0,195 Q_{Н} + 0,039$, $R^2 = 0,967$ (исполнение 1); 6 – $\rho_{мг} = 0,152 Q_{Н} + 0,068$, $R^2 = 0,963$ (исполнение 4 и 5, канавки 5 – 6 мм); 7 – $\rho_{ср} = 0,238 Q_{Н} - 0,118$, $R^2 = 0,829$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм); 8 – $\rho_{мг} = 0,060 Q_{Н} + 0,109$, $R^2 = 0,983$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм)

Проведенные исследования различных типов дождевателей позволили определить способы повышения радиуса полива и повышения дальности при ветре.

Распределение нормированного слоя дождя (h_i/h_{cp}) вдоль радиуса захвата дождевателем в зависимости от диаметра сопла и давления показаны на рис. 6.10- 6.11. С увеличением давления распределение слоя дождя вдоль радиуса захвата становится более равномерное для всех типов дождевателя. При этом принцип распределения слоя дождя не зависит от диаметра сопла.

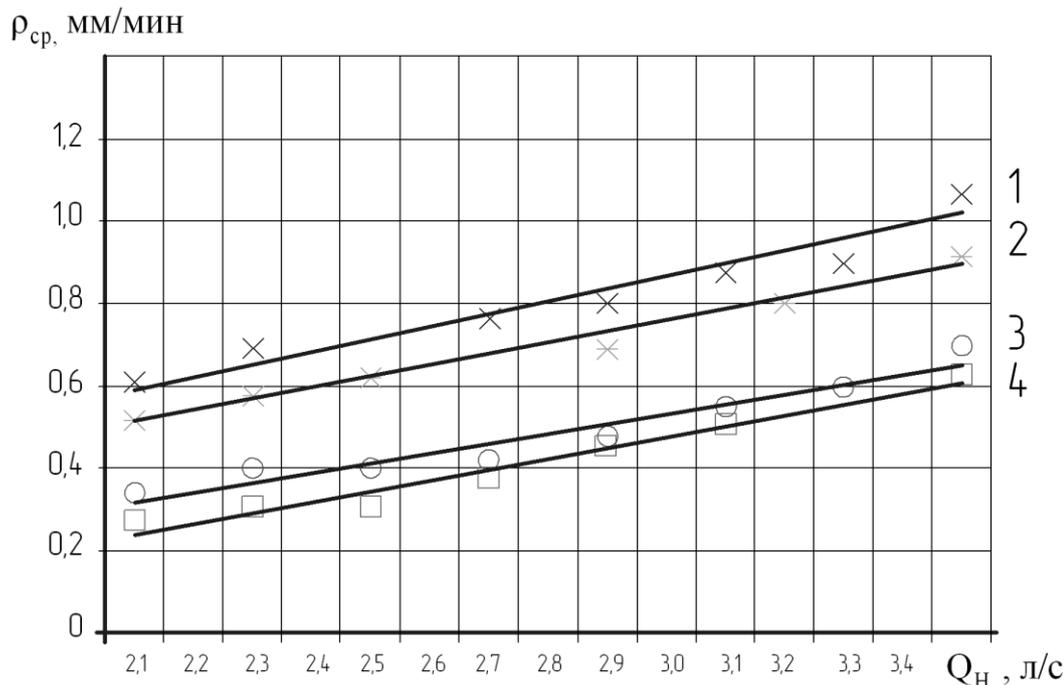


Рисунок 6.9 – Средняя (ρ_{cp}) интенсивность дождя при поливе дождевателями в зависимости от расхода диаметр сопла 15 мм:

1 – $\rho_{cp} = 0,308 Q_H - 0,056$, $R^2 = 0,835$ (исполнение 1); 2 – $\rho_{cp} = 0,273 Q_H - 0,058$, $R^2 = 0,983$ (исполнение 6); 3 – $\rho_{cp} = 0,239 Q_H - 0,183$, $R^2 = 0,933$ (исполнение 2 и 3); 4 – $\rho_{cp} = 0,261 Q_H - 0,306$, $R^2 = 0,937$ (исполнение 4 и 5)

Для дождевателей с гладким статическим дефлектором

При небольшом давлении $P_{BX}=0,05\dots0,10$ МПа основная масса дождя выпадает в конце радиуса захвата дождевателем, выпадая большими каплями [29].

При увеличении давления до $P_{BX}=0,1\dots0,50$ МПа струя распадается на мелкие капли и более равномерно распределяется вдоль радиуса захвата дождевателем [29].

Для дождевателей со статическим дефлектором с канавками

При небольшом давлении $P_{BX} = 0,05\dots0,10$ МПа струя также в большей степени выпадает в конце радиуса захвата дождевателем (рис. 6.12). При увеличении давления $P_{BX}=0,1\dots0,50$ МПа струя равномерно распределяется вдоль радиуса захвата дождевателем [29].

Для дождевателей с вращающимся дефлектором и канавками

При давлении $P_{BX} = 0,05\dots0,5$ МПа струя лучше распадается на капли и более равномерно распределяется вдоль радиуса, чем со статическим дефлектором [29].

При давлении $P_{BX} = 0,05 \dots 0,1$ МПа зона равномерности находится ближе к началу радиуса, при увеличении давления происходит смещение к концу и выравнивание по всему радиусу (рис. 6.13) [29].

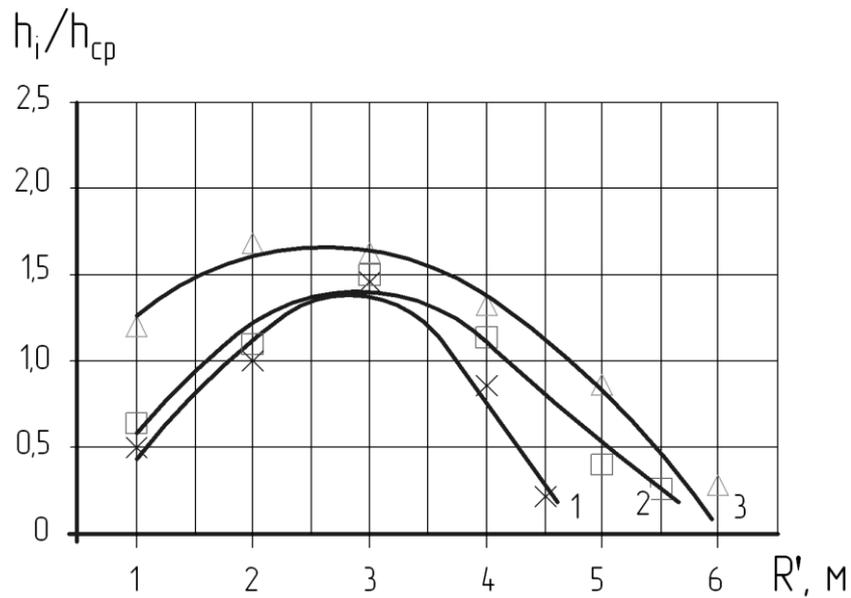


Рисунок 6.10– Распределение слоя дождя вдоль радиуса полива при диаметре сопла $\varnothing 3$ мм, исполнение 1:

1 – $P_{BX} = 0,08$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,010R'^3 - 0,111R'^2 + 0,919R' - 0,272$; $R^2 = 0,971$;

2 – $P_{BX} = 0,14$ МПа; $h_i/h_{cp} = 0,044R'^3 - 0,593R'^2 + 2,197R' - 1,07$; $R^2 = 0,851$;

3 – $P_{BX} = 0,32$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,141R'^2 - 0,756R' + 0,56$; $R^2 = 0,972$

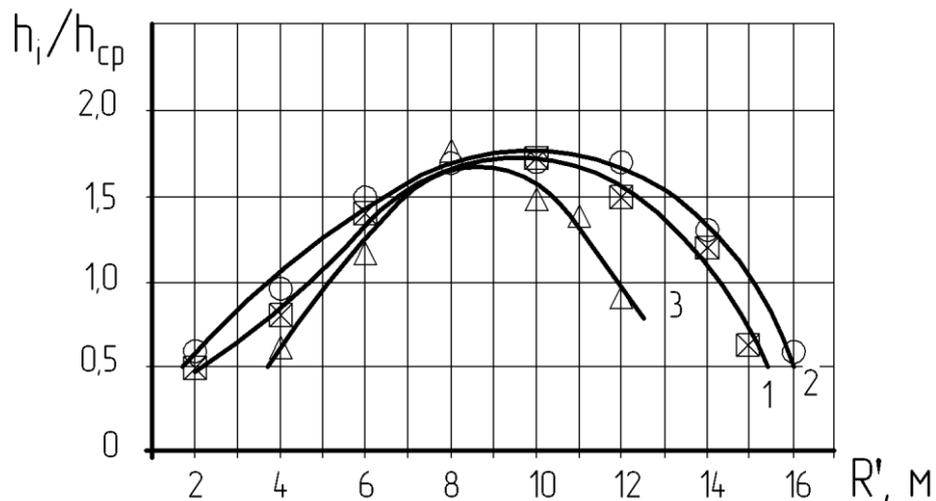


Рисунок 6.11 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса полива при диаметре сопла $\varnothing 10$ мм, исполнение 1:

1 – $P_{BX} = 0,12$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,156R'^2 + 0,948R' - 0,115$, $R^2 = 0,885$;

2 – $P_{BX} = 0,23$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,04R'^3 - 0,574R'^2 + 2,177R' - 1,066$, $R^2 = 0,881$;

3 – $P_{BX} = 0,08$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,010R'^3 - 0,153R'^2 + 1,176R - 0,512$, $R^2 = 0,99$

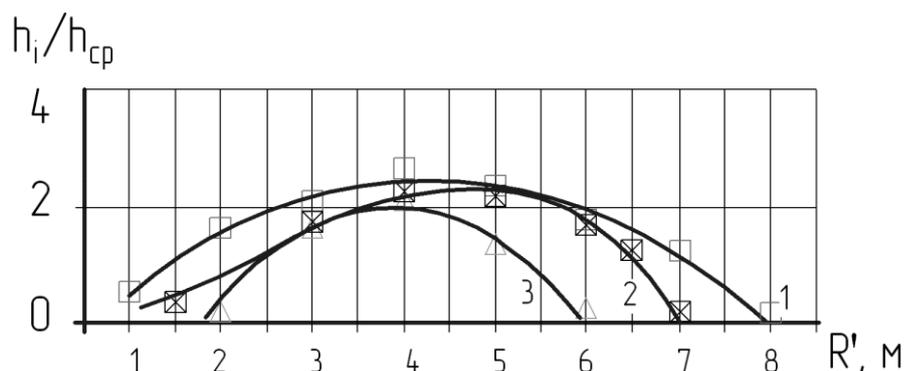


Рисунок 6.12 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса полива при диаметре сопла $\varnothing 5$ мм, исполнение 2 и 3: 1 – $P_{BX}=0,18$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,173R'^2+1,495R'-0,821$, $R^2=0,963$; 2 – $P_{BX}=0,12$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,225R'^2+1,847R'-1,504$, $R^2=0,911$; 3 – $P_{BX}=0,06$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,304R'^2+2,169R'-1,79$, $R^2=0,92$

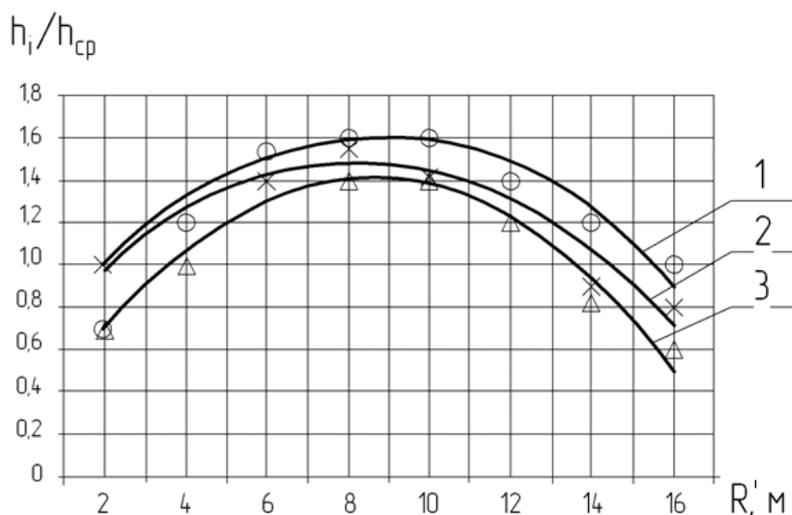


Рисунок 6.13 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса при диаметре сопла 12 мм и давлении 0,22 МПа: 1 – $h_i/h_{cp} = -0,015R'^2+0,291R'+0,25$, $R^2=0,948$ (исполнение 5, канавки 6 мм); 2 – $h_i/h_{cp} = -0,012R'^2+0,209R'+0,611$, $R^2=0,904$ (исполнение 4, канавки 5мм); 3 – каскадного $h_i/h_{cp} = -0,016R'^2+0,280R'+0,213$, $R^2=0,941$ (исполнение 6)

Для каскадных дождевателей

При давлении $P_{BX}=0,05\dots 0,5$ МПа обеспечивается высокая равномерность распределения дождя. Формами и размерами дефлектора и формой канавок подбирается характеристики распределения дождя вдоль радиуса полива [29].

Крупность капель дождя при поливе низконапорными дождевателями

Средний диаметр капель дождя увеличивается с увеличением относительного радиуса полета капель R_i/R , диаметра сопла и с уменьшением давления перед дождевателем [29]. Средний диаметр капель дождя дождевателей со стационарным гладким дефлектором и с канавками увеличивается с увеличением диаметра сопла и с уменьшением давления перед дождевателем (рис.6.14, 6.15).

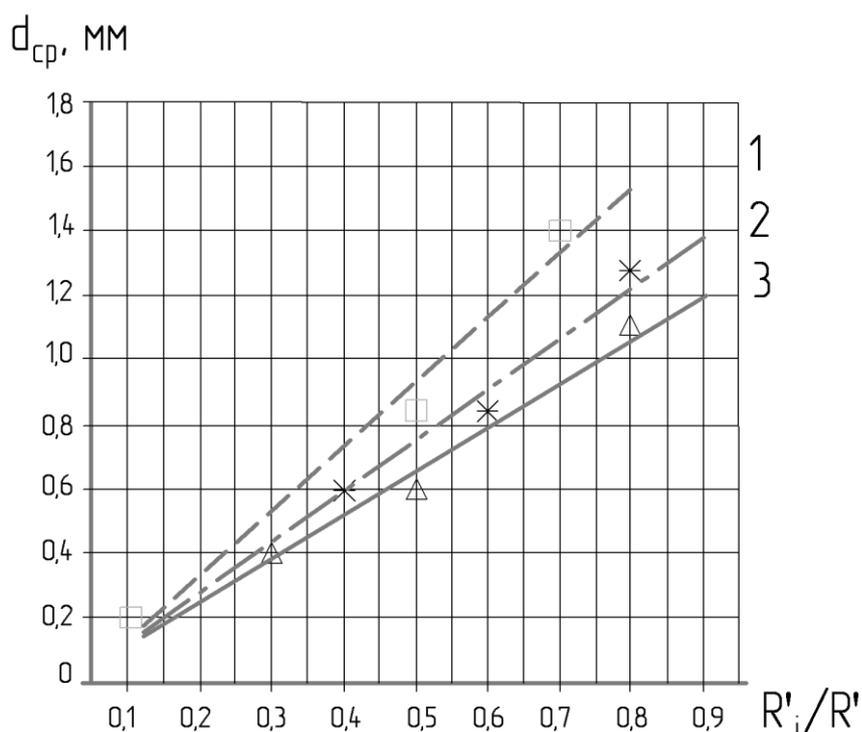


Рисунок 6.14 – Изменение среднего диаметра капель с увеличением относительного радиуса полета капель R'_i/R' при диаметре сопла $\varnothing 6$ мм:

- 1 – $P_{ВХ} = 0,08$ МПа, $d_{CP} = 2,0R'_i/R' - 0,06$, $R^2 = 0,957$;
- 2 – $P_{ВХ} = 0,14$ МПа, $d_{CP} = 1,621R'_i/R' - 0,034$, $R^2 = 0,969$;
- 3 – $P_{ВХ} = 0,3$ МПа, $d_{CP} = 1,453R'_i/R' - 0,032$, $R^2 = 0,978$.

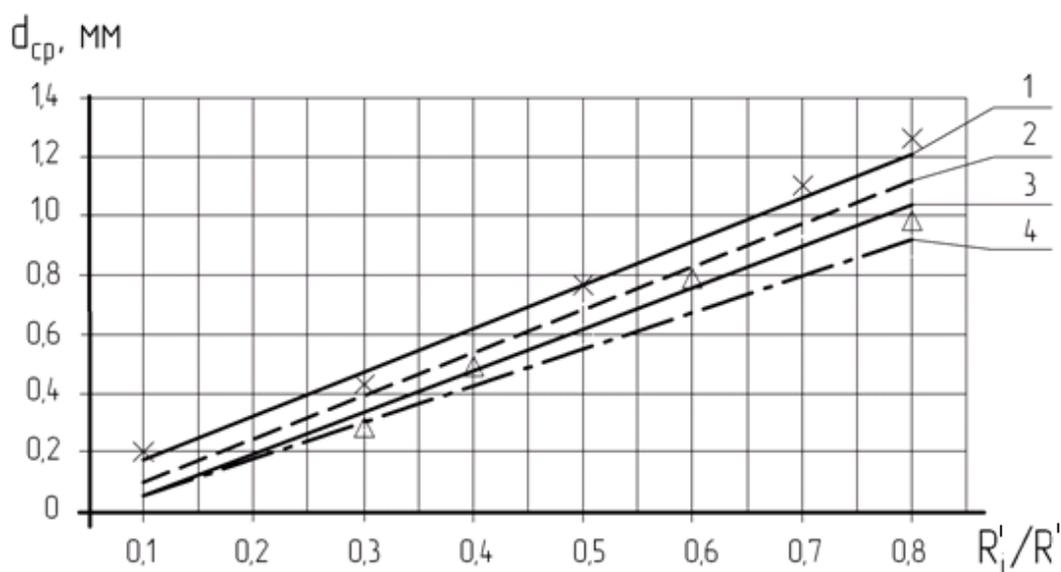


Рисунок 6.15 – Изменение среднего диаметра капель с увеличением относительного радиуса полета капель R'_i/R' : 1 – $d_{CP} = 1,464 R'_i/R' + 0,032$, $R^2 = 0,984$ (исполнение 2, $P_{ВХ} = 0,16$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм); 2 – $d_{CP} = 1,432 R'_i/R' - 0,035$, $R^2 = 0,998$ (исполнение 3, $P_{ВХ} = 0,16$ МПа, диаметр сопла 8 мм); 3 – $d_{CP} = 1,389 R'_i/R' - 0,079$, $R^2 = 0,982$ (исполнение 2, $P_{ВХ} = 0,18$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм); 4 – $d_{CP} = 1,147 R'_i/R' - 0,005$, $R^2 = 0,991$ (исполнение 3, $P_{ВХ} = 0,2$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм)

Для дождевателей, имеющих дефлектор с канавками зависимость более пологая, диаметр каплей меняется в меньшей степени и в среднем на 15-20% меньше (рис. 6.16).

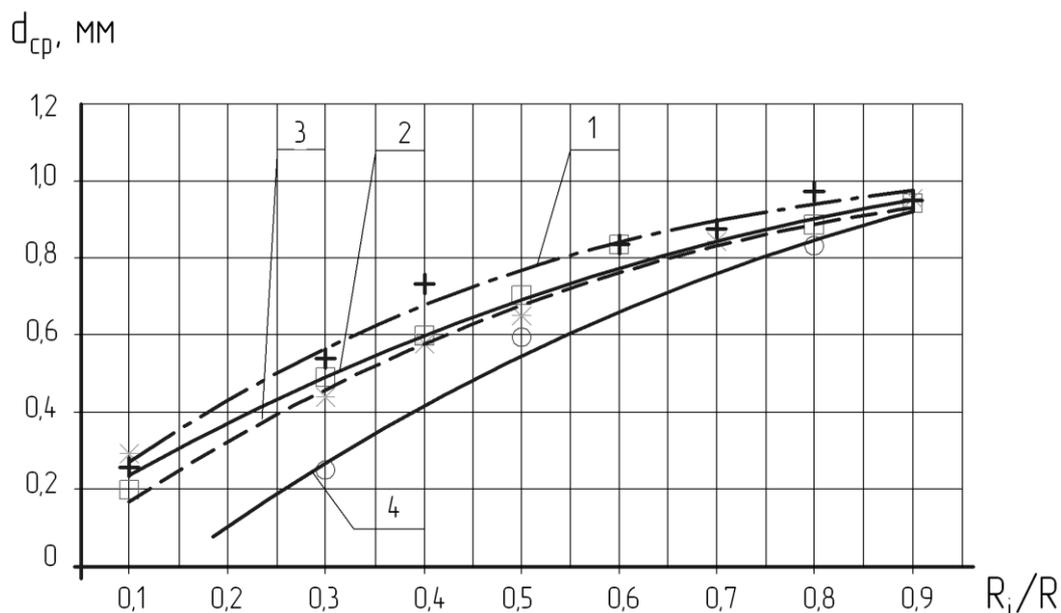


Рисунок 6.16 – Изменение среднего диаметра каплей дождевателя с вращающимся дефлектором с изменением относительного радиуса полета каплей R'_i/R' : 1 – $d_{ср} = -1,383(R'_i/R')^2 + 2,27(R'_i/R') - 0,01$, $R^2 = 0,910$ (исполнение 4, канавки 2 мм, $P_{вх} = 0,28$ МПа); 2 – $d_{ср} = -0,619(R'_i/R')^2 + 1,519 R'_i/R' + 0,088$, $R^2 = 0,905$ (исполнение 4; канавки 2 мм, $P_{вх} = 0,18$ МПа); 3 – $d_{ср} = -0,918(R'_i/R')^2 + 1,868 R'_i/R' - 0,008$, $R^2 = 0,979$ (исполнение 5; канавки 5 мм, $P_{вх} = 0,2$ МПа); 4 – $d_{ср} = -0,8(R'_i/R')^2 + 2,04 R'_i/R' - 0,22$, $R^2 = 0,99$ (исполнение 5; канавки 5 мм, $P_{вх} = 0,35$ МПа)

Исследования показывают, что диаметр каплей в конце радиуса выравнивается для всех типов дождевателей и не превышает 1,6 мм даже при низких давлениях до 0,1 МПа [63].

Рассматривая работу дождевателей каскадного исполнения 6 можно заметить, что они обеспечивают диаметр каплей в пределах нормы при низких давлениях и максимальных диаметрах сопла 15 мм (рис. 6.17).

При помощи дождевателей с каскадными дефлекторами можно обеспечивать достаточно мягкий режим орошения при больших расходах.

Таким образом, проведенные выше исследования различных типов дождевателей позволили сделать вывод, что на второй половине трубопровода для снижения мгновенной интенсивности дождя эффективно использовать дождеватели с вращающимся дефлектором или каскадных.

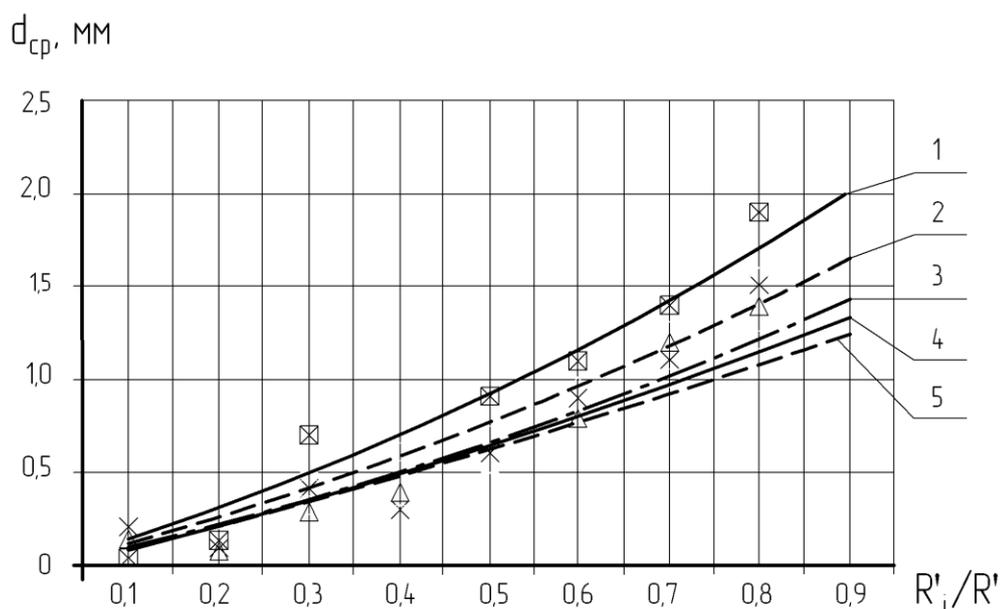


Рисунок 6.17 – Изменение среднего диаметра капель каскадного дефлектора с увеличением относительного радиуса полета капель R'_i/R' , исполнение б:

1 – $d_{ср} = 2,257 (R'_i/R')^{1,320}$, $R^2 = 0,940$; $P_{ВХ} = 0,18$ МПа, диаметр сопла Ø15 мм;

2 – $d_{ср} = 1,882 (R'_i/R')^{1,303}$; $R^2 = 0,953$; $P_{ВХ} = 0,09$ МПа, диаметр сопла Ø13 мм;

3 – $d_{ср} = 1,608 (R'_i/R')^{1,279}$; $R^2 = 0,968$, $P_{ВХ} = 0,3$ МПа, диаметр сопла Ø15 мм;

4 – $d_{ср} = 1,505 (R'_i/R')^{1,247}$; $R^2 = 0,846$; $P_{ВХ} = 0,18$ МПа, диаметр сопла Ø13 мм;

5 – $d_{ср} = 0,391 (R'_i/R')^{1,124}$; $R^2 = 0,742$; $P_{ВХ} = 0,22$ МПа, диаметр сопла Ø13 мм.

Расстановка дождевателей на водопроводящем поясе ДМ

Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность орошения дождеванием, является равномерность распределения слоя по площади полива. Потери урожая от неравномерного полива практически пропорциональны коэффициенту неравномерности. Сложность выбора оптимальной расстановки дождевателей заключается в одновременном учете многих факторов, влияющих на равномерность. К числу основных относятся конструктивные (типа дождевателя, давление на входе в машину) и природные (скорость и направление ветра).

Проведенные исследования позволяют дать следующие рекомендации [29]:

Дождеватели с гладким дефлектором:

– для давления до 0,2 МПа – рекомендуемая расстановка через 3,0 м;

– для давления от 0,2 до 0,6 МПа – через 3,5 м.

Дождеватели со стационарном дефлектором с канавками:

– для давления до 0,2 МПа – рекомендуемая расстановка через 3,5 м;

– для давления от 0,3 до 0,6 МПа – через 4-4,5 м.

Дождеватели с вращающимся дефлектором с канавками:

– для давления до 0,2 МПа – рекомендуемая расстановка через 4,0 м;

– для давления от 0,3 до 0,6 МПа – через 5-6 м.

Дождеватели каскадные:

– для давления до 0,2 МПа – рекомендуемая расстановка через 3,0 м;

– для давления от 0,3 до 0,6 МПа – через 3,5-4,0 м.

Для однопролетной ДМ (длиной до 60 м), среднего ветрового режима рекомендуется применение дождевателей с гладким дефлектором.

Для ДМ длиной 60-300 м – дождевателей с дефлектором с мелкими канавками.

Для ДМ более 300 м рационально совместное применения стационарных дефлекторов и вращающихся, начиная с $\frac{1}{2}$ длины водопроводящего пояса.

Для длинных ДМ, более 500 м, или работающих при высоких расходах рационально применение каскадных дождевателей, начиная с $\frac{2}{3}$ длины водопроводящего трубопровода.

Для орошения в зонах с повышенным ветровым режимом рекомендуются дождеватели со стационарными или вращающимися дефлекторами с канавками.

Для проращивания ростков и щадящего воздействия на почву и растения рекомендуется применение дефлекторов с мелкими канавками.

При больших расходах для повышения равномерности – каскадные дождеватели.

Наибольшие потери воды при поливе дождевателями, смонтированными на трубопроводе машины, не превышают 5% при подъеме дождевого облака до уровня трубопровода машины при скорости ветра в границах, рекомендуемых режимом эксплуатации.

Обработка результатов опытов показывает, что равномерность полива при скорости ветра до 3 м/с достаточно высокая, коэффициент эффективности полива составил при работе ДМ «Фрегат» с установленными по учащенной схеме дождевателями типа 1 исполнения 1 при давлении на входе в машину 0,34 МПа – 0,76-0,8 [29].

При работе ДМ «Кубань-ЛК1» модели 212 с установленными по учащенной схеме через 3,5 м дождевателей типа 1 исполнения 1 при давлении на входе в машину 0,4 МПа – 0,76-0,8 [29].

При работе ДМ «КАСКАД» модели 497-90 с установленными по учащенной схеме через 3,5 м при давлении на входе в машину 0,35 МПа дождевателями типа 2 исполнения 2 – 0,77 на фоне 1, и 0,87 на фоне 2.

При работе ДМ «КАСКАД» модели 497-90 с дождевателями типа 2 исполнения 5 с $\frac{1}{2}$ длины водопроводящего пояса и исполнения 1 до $\frac{1}{2}$ водопроводящего пояса по учащенной схеме через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,3 МПа – 0,88.

При работе ДМ «КАСКАД» длиной 434 м с дождевателями типа 2 исполнения 6 с $\frac{2}{3}$ длины водопроводящего трубопровода и исполнения 2 типа 1 до $\frac{2}{3}$ длины через 4,5 м при напоре на входе в машину 0,35 МПа – 0,86.

Для ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) модели 497-90 с дождевателями типа 1 исполнения 1, установленными по учащенной схеме через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,35-0,4 МПа – 0,86.

6.2 Лабораторные исследования влияния давления воздуха в шине и нагрузки, приходящейся на ось колеса на глубину колеи и сопротивление передвижению колес

Полученные результаты проведения экспериментов показали зависимость глубины колеи и сопротивления передвижению колес от изменения факторов при взаимодействии колеса с почвой. Видно, что глубина колеи (рисунок 6.18) и сопротивление передвижению колес (рисунок 6.19) прямо пропорциональны величине нагрузки, приходящейся на ось колеса и давления воздуха в шине.

При поддержании постоянного давления воздуха в шинах повышение нагрузки, приходящейся на ось пневматического колеса с 0,1 кН до 1,0 кН приводит к увеличению глубины колеи до 2 см для двухколесной ходовой тележки и порядка 1-1,5 см для трехколесной тележки соответственно, глубина колеи после каждого прохода увеличивается по линейному закону, рисунок 6.20.

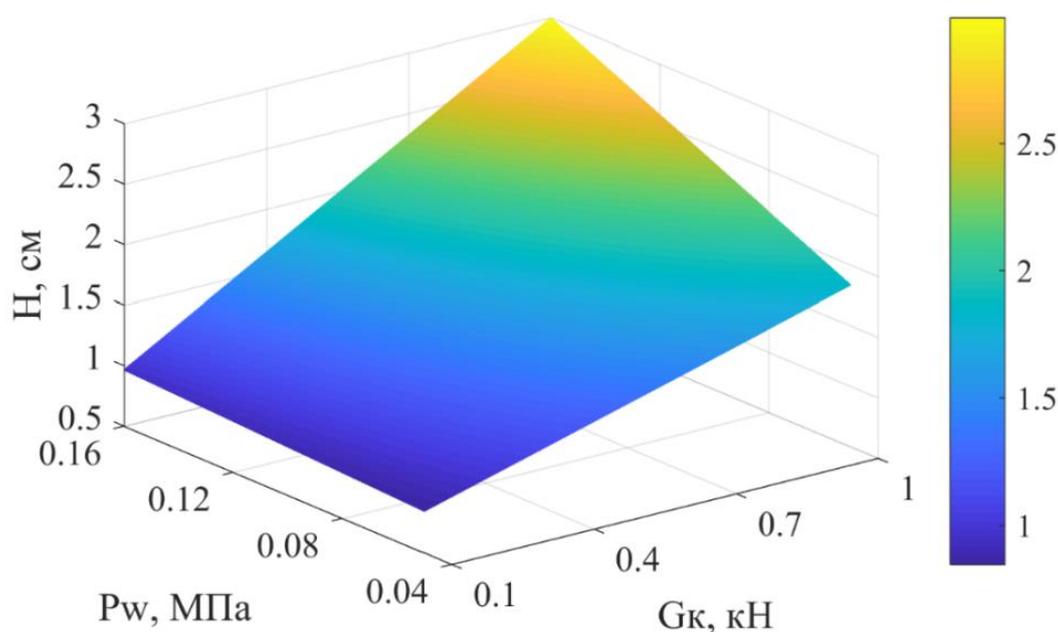


Рисунок 6.18 – Зависимость глубины колеи от нагрузки, приходящейся на ось колеса и давления воздуха в шине

С возрастанием давления воздуха в шинах с 0,05 МПа до 0,1 МПа глубина колеи увеличивается на 20%. Глубина колеи резко повышается и достигает максимального значения 30% при увеличении давления с 0,1 МПа до 0,16 МПа.

Сопротивление передвижению пневматического колеса достигает максимального значения 0,072 кН.

С увеличением давления, создаваемого пневматическим колесом, увеличивается остаточная деформация т.е. глубина колеи, и, следовательно, возрастает сопротивление передвижению пневматического колеса.

Аналогичная тенденция была зафиксирована в процессе исследования влияния давления воздуха в шинах на сопротивление передвижению колес.

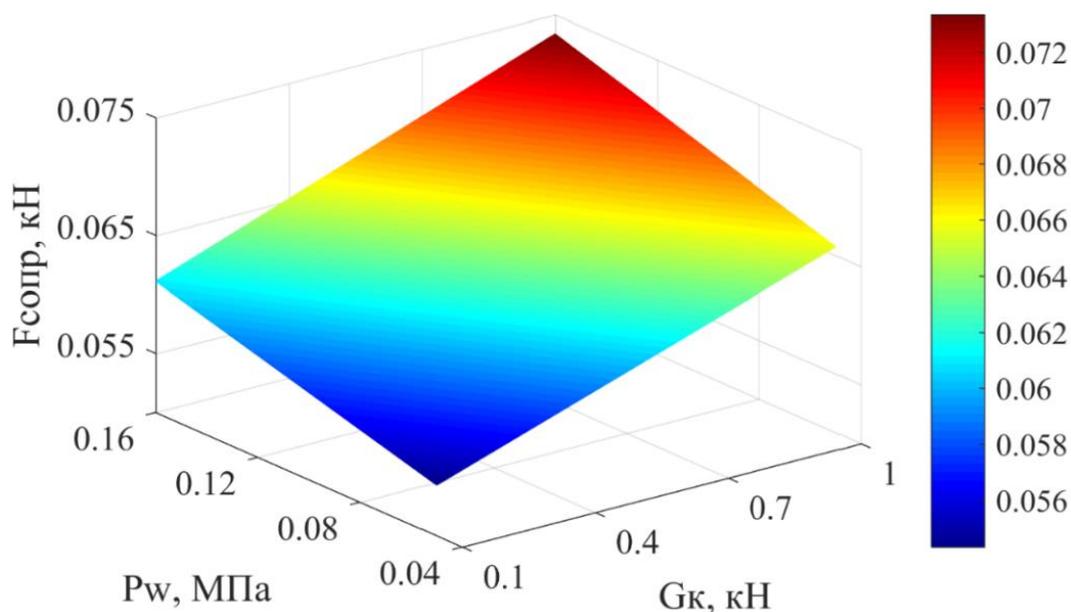


Рисунок 6.19 – Зависимость сопротивления передвижению колес от нагрузки, приходящейся на ось колеса и давления воздуха в шине

Сопротивление передвижению пневматического колеса возрастает в среднем на 25% при повышении давления воздуха в шинах с 0,05 МПа до 0,16 МПа, и при давлении в шинах равным 0,16 МПа сопротивление достигает максимального значения.

Подобные процессы объясняются тем, что в пятне контакта пневматического колеса с почвой, при повышении нагрузки, приходящейся на колесо контактные нормальные давления возрастают. Почва продолжает деформироваться до тех пор, пока величина нормальных давлений больше сопротивления сжатию почвы.

При снижении давления воздуха в шинах колес возрастает площадь контакта пневматических колес с почвой, вследствие чего уменьшается величина глубины колеи.

6.3 Оценка энергетических показателей при поливе ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и ДМ «КАСКАД» с низконапорными дождевателями

Известно, что дождь в зависимости от его мощности оказывает различное энергетическое воздействие на почву. Дождь более высокой мощности разрушает ее верхний слой, увеличивая плотность.

Для оценки максимальной скорости падения капель можно использовать формулу

$$V_K = 4,11d_K^{0,5}, \quad (6.1)$$

Удельная мощность дождя имеет вид, Вт/м²:

$$N_{уд} = 0,0083\rho_{ср} \sum_{i=1}^n (n_i V_{Ki})^2 = 0,14\rho_{ср} d_K, \quad (6.2)$$

$\rho_{ср}$ – интенсивность дождя, мм/мин; n_i – доля капель i -го размера;

V_{Ki} – скорость падения капель i -го размера.

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 6.1 [29].

Таблица 6.1 – Плотность верхнего слоя почвы (0-5 см) при поливе ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и ДМ «КАСКАД» с различными типами дождевателей

Место установки дождевателя	Тип дождевателя	Мощность дождя, Вт/м ²	Плотность почвы, г/см ³
Схема 6, 3 полив			
Первый пролет	Тип 1, исполнение 1	0,018	1,03
Пятый пролет		0,042	1,06
Предконсольный пролет		0,105	1,11
Схема 3, 3 полив			
Первый пролет	Тип 2, исполнение 2 Мелкие канавки	0,015	1,04
Пятый пролет		0,048	1,07
Предконсольный пролет		0,097	1,10
Схема 4, 4 полив			
Первый пролет	Тип 1, исполнение 1	0,019	1,04
Пятый пролет	Тип 1, исполнение 1	0,053	1,08
Предконсольный пролет	Тип 2, исполнение 5	0,085	1,10
Схема 5, 4 полив			
Первый пролет	Тип 2, исполнение 2	0,016	1,06
Пятый пролет	Тип 2, исполнение 2	0,046	1,10
Предконсольный пролет	Тип 2, исполнение 6	0,105	1,12
Богара			1,01

Из таблицы 6.1 видно, что дождеватели, установленные на гибких спускных трубопроводах приповерхностного полива, установленные как в начале, так и в конце машины уплотняют верхний слой почвы незначительно, благодаря уменьшению крупности капель и мощности дождя обеспечивается щадящее воздействие на почву.

Таким образом, исследования показали, что при поливе с дождевателями мелкокапельный дождь имеет незначительную мощность и не уплотняет верхний слой почвы. Плотность почвы даже после 3 поливов находится на уровне плотности почвы на богарном участке.

6.4 Норма полива до стока при поливе ДМ с низконапорными дождевателями

Исследования нормы полива до стока при поливе ДМ, оборудованными низконапорными дождевателями согласно предложенным схемам представлены в таблице 6.2.

У серийно выпускающихся дождевальными машин «Фрегат» наиболее опасным участком в отношении образования поверхностных стоков и ирригационной эрозии является участок, расположенный в конце водопроводящего трубопровода, где дождевальные аппараты имеют, увеличенный диаметр сопел, значительный расход и крупнокапельный дождь ($d_{cp} \approx 2,0$ мм).

Проведенные исследования позволили установить, что для ДМ «Фрегат», в целях снижения ударного воздействия дождя (уменьшения диаметра капель), а также, исходя из возможности снижения напора на входе в машину рекомендуется устанавливать низконапорные дождеватели в соответствии со схемой 1 типа 1 исполнения 1. А при работе на больших нормах полива в концевой части машины устанавливать дождеватели типа 2 исполнения 4 или 5 с вращающимся дефлектором, либо каскадные исполнения 6.

Таблица 6.2 – Фактические и расчетные значения несущей способности почвы от режима орошения

Тип почвы	Несущая способность почвы до полива $R_{дп}$, кПа	Схема расстановки дождевателей на машине	Эффективная норма полива, $m^3/га$	Достоковая норма полива, $m^3/га$	Величина стока $m^3/га$	Несущая способность почвы после полива $R_{пп}$, кПа	
						экспериментальная	теоретическая
Чернозем обыкновенный	150-155	Схема 1 «Фрегат» ДМУ-Б463-90	296	520	0	62	60,4
			396	525	0	63	59,9
			494	520	0	64	60,4
	150-155	Схема 2 «Кубань-ЛК1»	305	530	0	60	59,4
			400	540	0	58	58,4
			510	535	0	61	58,9
Темно-каштановый суглинок	180-185	Схема 4 «КАСКАД»	300	535	0	93	88,9
			405	540	0	92	88,4
			495	550	0	86	87,4
	210-220	Схема 6 «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)	300	380	0	140	135,4
			405	385	20	139	134,9
			500	390	110	119	118,5
		Схема 5 «КАСКАД»	295	382	0	160	135,2
			420	390	30	145	131,5
			500	395	105	125	119,6

Оснащение машин усовершенствованными схемами расстановок и типами дождевателей в зависимости от почвенно-рельефных условий позволило вследствие снижения ударного воздействия дождя на почву, увеличить достоковую норму полива и соответственно уменьшить величину стока, особенно в концевой части машины.

Оборудование ДМ низконапорными дождевателями по предлагаемым схемам расстановки обеспечивает в сравнении с серийной машиной ДМ «Кубань-ЛК1» и ДМ «КАСКАД» более качественное распределение слоя осадков по длине машин. Средняя интенсивность дождя ДМ равная 0,5-0,55 мм/мин при диаметре капель в пределах 0,7-1,0 мм обеспечивает возможность проведения ресурсосберегающих технологий полива, позволяет увеличить достоковую поливную норму, увеличивая соответственно несущие свойства почвы в зоне последних тележек и уменьшить глубину колеи от ее ходовых систем.

Оборудование обеих модификаций ДМ предлагаемыми схемами расстановки низконапорных дождевателей обеспечило в сравнении с серийным их исполнением более качественное распределение слоя осадков по длине машин. Коэффициент эффективного полива имел высокое значение и находился в пределах 0,801...0,805. Это обуславливалось меньшими значениями переполива под первыми пролетами и последними.

Средняя интенсивность дождя ДМ равна 0,53 и 0,55 мм/мин при диаметре его капель в пределах 0,85 и 0,86 мм, соответственно, обеспечивала возможность проведения, ресурсосберегающих технологий полива.

6.5 Результаты исследования колееобразования для различных почвозащитных схем расстановки дождевателей, длин пролетов и ходовых систем

Максимальное значение глубины колеи за поливной сезон, как показывает опыт эксплуатации ДМ в зонах орошаемого земледелия, не должно превышать $0,05 \pm 0,02$ м. Дальнейшее увеличение глубины колеи, особенно на глинистых почвах при больших поливных нормах, ведет к увеличению ее ширины и образованию почвенных призм выпирания, что увеличивает заминаемость растений, повышает эрозию почвы.

При работе ДМ с небольшими поливными нормами на легкоуплотняющихся почвах, деформируемых без их выпирания в стороны, для узкопрофильных колес допускается увеличение глубины колеи в конце поливного сезона до 0,13-0,15 м. Как известно, данные нормы редко бывают соблюдены на серийных машинах.

Интенсивное уменьшение давления колес машин на почву при средних нагрузках (10-20 кН) присущих для практически применяемых длин и диаметров труб пролетов дождевательных машин «Фрегат», «Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М»

(КАСКАД), ДМ «КАСКАД», происходит при увеличении опорной поверхности колес до 0,30-0,50 м². Дальнейшее увеличение площади колесных движителей не имеет практического смысла, так как это влечет за собой значительное увеличение габаритов колес или их количества. С увеличением нагрузки растет и значение предела опорной поверхности.

Применение на машинах оптимизированных схем расстановок, типов дождевателей позволило подобрать более экологически и экономически обоснованные типы колесных систем.

Нагрузочный режим на колесные системы тележек ДМ варьируется изменением длин пролетов и диаметров их водопроводящего трубопровода.

Результаты теоретических исследований по подбору пневматических колес для ДМ типа «Фрегат» и «Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД), ЭДМ «КАСКАД» были подтверждены экспериментально.

Анализ данных показывает, что на почвах повышенной прочности при использовании низконапорных дождевателей ДМ целесообразно оборудовать узкими пневмоколесами. На почвах с низкой несущей способностью и значительными поливными нормами от 600 м³/га - более широкопрофильными пневматическими шинами 18-24; 23-26, 21.3-24 для ДМ «Кубань-ЛК1», «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД); «КАСКАД с шириной профиля 0,30-0,54 м, в том числе установкой более широкопрофильных шин в концевой части машин.

Кроме того в условиях пониженной прочности почв возможно применение на ДМ шин с меньшими значениями ширины профиля, нежели рекомендуемые, но для уменьшенных величин длин пролетов ДМ или уменьшенного диаметра водопроводящего трубопровода.

Результаты исследований глубины колеи от порядкового номера опорной тележки при несущей способности почвы 110-125 кПа после первого прохода для ДМ «Кубань-ЛК1М» длиной 497 м при оборудовании разными типами дождевателей показаны на рис. 6.18. Схема расстановки дождевателей по схеме 4, т.е. исполнения дождевателей 5 со 1/2 длины водопроводящего пояса и исполнения дождевателей 1 до 1/2 длины водопроводящего пояса показывают небольшое снижение глубины колеи в пределах 1,5-1 см. Глубина колеи в обоих случаях не превышает 6 см [29].

В конце поливного сезона вид зависимости глубины колеи от порядкового номера тележки меняется с линейной на квадратичную. На последних тележках колея снова возрастает за счет увеличения расхода и крупности капель. При этом при установке дождевателей по схеме 4 возрастание колеи происходит в меньшей степени за счет снижения интенсивности, увеличения радиуса распыла и уменьшения диаметра капель (рис.6.20).

При увеличении пролета до 59,5 м и установке колес с шинами 16,9-24, а также дождевателей по схеме 5 колея снижается до 4 см на первой тележке за первый проход и до 9 см в конце поливного сезона, несмотря на увеличение длины пролета до 59,5 м (рис. 6.21).

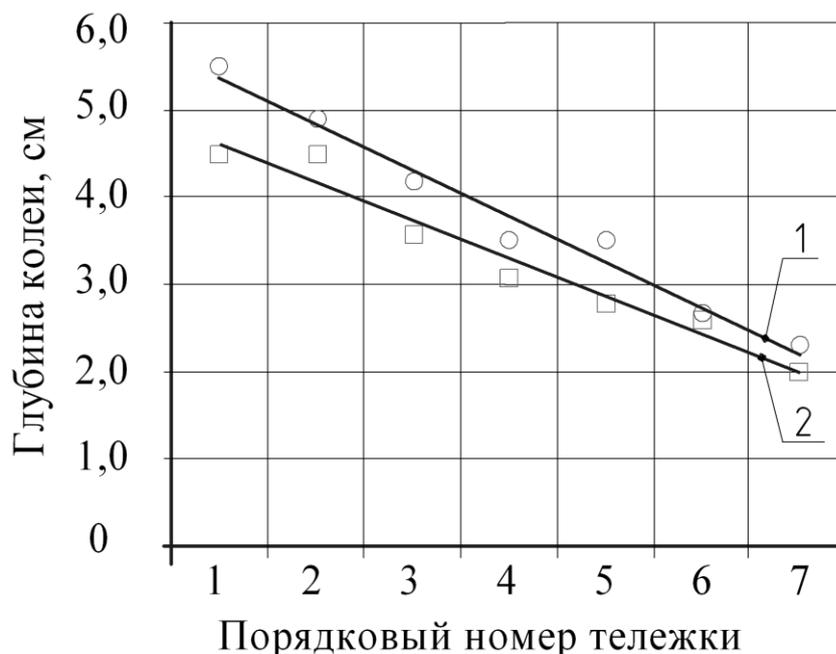


Рисунок 6.19 – Зависимость глубины колеи от номера опорной тележки при несущей способности почвы 110-125 кПа после первого прохода: 1 – ДМ «Кубань-ЛК1М» (48,7 м пролет, шины 14,9-24, схема расстановки 6), $H'' = -0,525n_{OT} + 5,9$; $R^2 = 0,976$; 2 – ДМ «Кубань-ЛК1М» (48,7 м пролет, шины 14,9-24, схема расстановки 4), $H'' = -0,432n_{OT} + 5,028$; $R^2 = 0,961$.

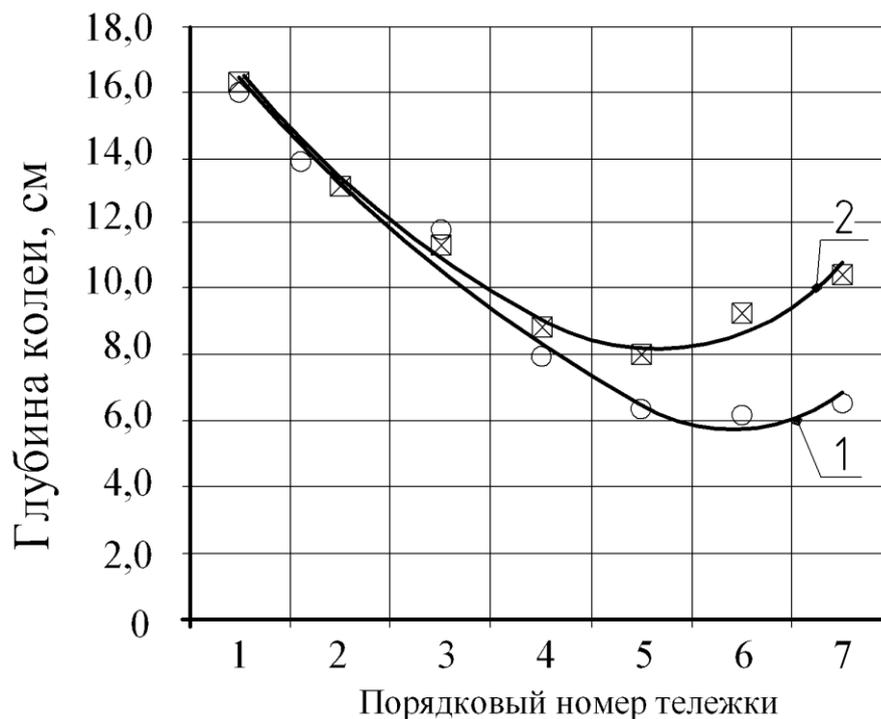


Рисунок 6.20 – Зависимость глубины колеи от номера опорной тележки в конце поливного сезона: 1 – ДМ «Кубань-ЛК1М» (48,7 м пролет, шины 14,9-24, схема расстановки 6), $H'' = 0,041n_{OT}^3 + 0,023n_{OT}^2 - 3,489n_{OT} + 19,8$; $R^2 = 0,967$; 2 – ДМ «Кубань-ЛК1М» (48,7 м пролет, шины 14,9-24, схема расстановки 4), $H'' = 0,125n_{OT}^3 - 1,197n_{OT}^2 + 0,927n_{OT} + 16,15$; $R^2 = 0,986$.

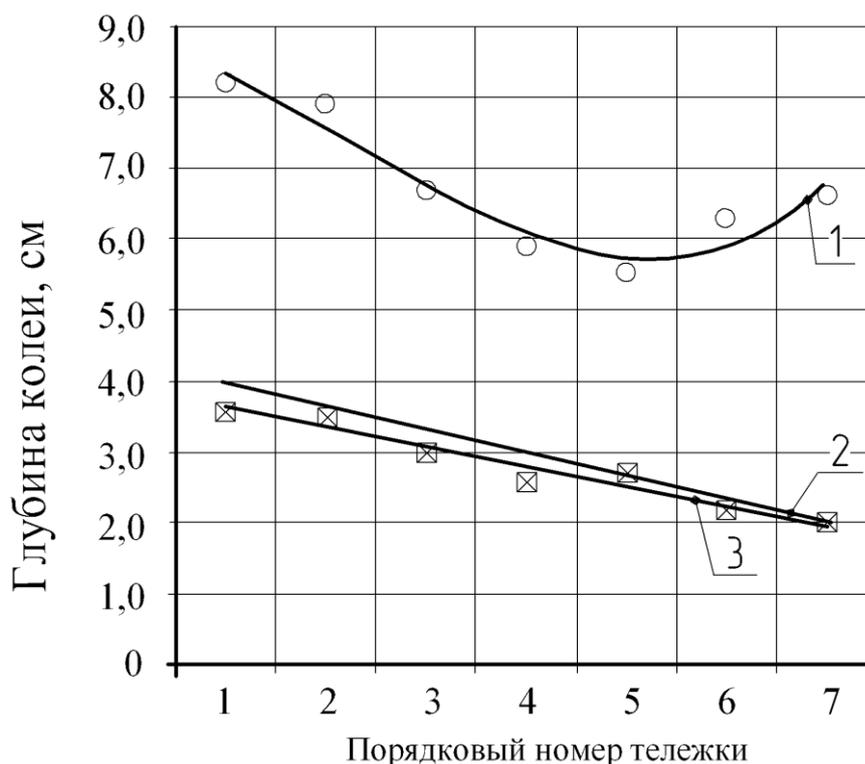


Рисунок 6.21 – Зависимость глубины колеи от номера опорной тележки при несущей способности почвы 110-125 кПа в начале (1) и конце (2) поливного сезона, ДМ «Кубань-ЛК1М» (59,5 м пролет, шины 16,9-24, схема расстановки 5:

1 – $H''=0,03n_{OT}^3-0,206n_{OT}^2-0,357n_{OT}+8,871$; $R^2=0,935$; 2– теоретическая зависимость; 3 – $H''= -0,275n_{OT}+3,9$; $R^2=0,953$. Достоверность аппроксимации уравнений составляет 0,95.

Исследования глубины колеи ДМ «Фрегат» с жесткими колесами на почвах несущей способностью 85-105 кПа, оборудованных дождевателями типа 1, показывают значительную глубину колеи, достигающую 35 см в конце поливного сезона (рис. 6.22).

Проведенные исследования позволили установить, что для ДМ Фрегат, в целях снижения ударного воздействия дождя (уменьшения диаметра капель), а также, исходя из возможности снижения давления на входе в машину, рекомендуется устанавливать дождеватели в соответствии со схемой 5. А при работе на больших нормах полива в концевой части машины устанавливать дождеватели типа с вращающимся дефлектором либо каскадные [29].

При установке низконапорных дождевателей по схеме расстановки 5 хорошо заметно снижение колеи в конце поливного сезона до 18 см, с учетом уменьшения на один круг работы (рис. 6.23).

В целях дальнейшего снижения стоимости ДМ кругового действия является целесообразным оборудование машин разнопрофильными шинами.

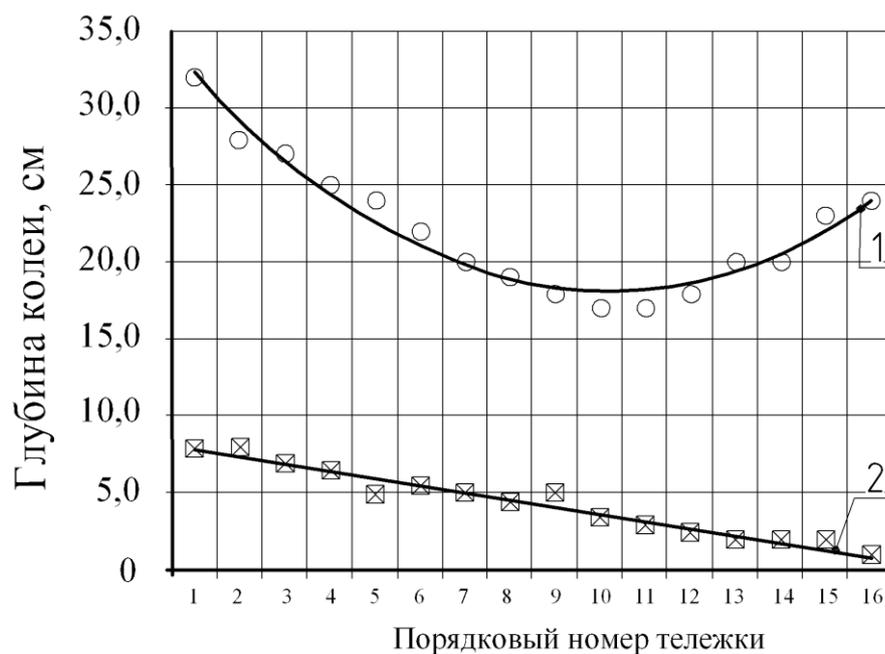


Рисунок 6.22 – Зависимость глубины колеи от номера опорной тележки при несущей способности почвы 85-105 кПа в начале (1) и конце (2) поливного сезона, ДМ «Фрегат» ДМУ-Б-463-90 (жесткие колеса, схема расстановки 1)

$$1 - H'' = 0,169n_{OT}^2 - 3,439n_{OT} + 35,55; R^2 = 0,964;$$

$$2 - H'' = -0,459n_{OT} + 8,312; R^2 = 0,962 .$$

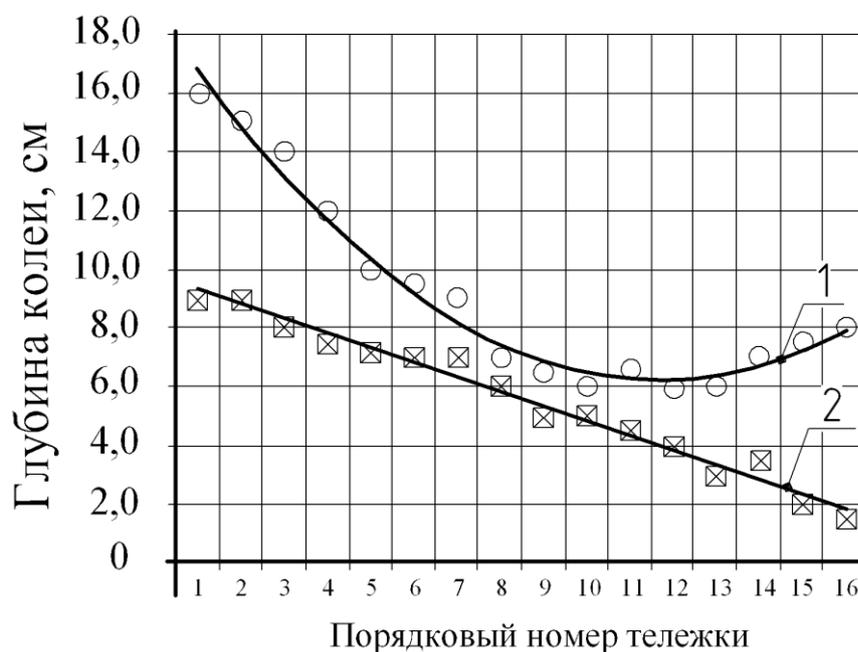


Рисунок 6.23 – Зависимость глубины колеи от номера опорной тележки при несущей способности почвы 75-95 кПа в начале (1) и конце (2) поливного сезона ДМ «Фрегат» ДМУ-Б-463-90 (жесткие колеса, схема расстановки 5):

$$1 - H'' = 0,093n_{OT}^2 - 2,17n_{OT} + 18,87; R^2 = 0,981;$$

$$2 - H'' = -0,493n_{OT} + 9,767; R^2 = 0,978.$$

Данные исследований показывают, что под всеми машинами, оснащенными по оптимизированным схемам низконапорными дождевателями, величины до- стоковых поливных норм по их длине имеют практически равное значение эф- фективным их значениям.

Проведенные исследования позволили определить ориентировочные зоны применения колесных систем в зависимости от несущей способности почвы:

1 – повышенной несущей способности (тяжелосуглинистые почвы, нормы полива до 300 м³/га, $R_{ПП} \geq 80-100$ кПа) узкопрофильные пневматические колеса. Глубина колеи – не более $H''=0,08-0,1$ м.

2 – средней несущей способности (суглинистые почвы, нормы полива 300- 500 м³/га, $R_{ПП} \geq 60-80$ кПа) – обычные шины. Глубина колеи – $H''=0,05-0,1$ м.

3 – низкой несущей способности (легкие, норма полива более 500 м³/га, $R_{ПП} < 60$ кПа) – широкопрофильные шины, $H=0,1-0,15$ м.

Полученные экспериментальные данные хорошо сочетаются с показате- лями теоретических расчетов.

6.6 Результаты сравнения стандартной и предлагаемой технологий полива электрифицированными дождевальными машинами кругового действия

Экспериментальные исследования проводились на соседних участках по- лива. Поливная норма при стандартной технологии полива составляла 400 м³/га.

Поливной сезон был разбит на декады, в течение которых отмечались осадки и выдаваемая поливная норма.

Влажность почвы (до 0,8 м) практически не отличается от влажности почвы поливаемой по стандартной технологии.

Оросительная норма по стандартной технологии вносилась за 4 полива по 400 м³/га. Оросительная норма по оптимизированной подаче в 2020 году соста- вила 1570 м³/га и 1490 м³/га, что соответственно на 30 и 110 м³/га меньше. Полу- ченные данные представлены в таблице 6.3, рис. 6.24-6.27.

Таблица 6.3– Сравнительные данные по оросительной норме по стандарт- ной технологии и оптимизированной подаче воды на одну машину на 1 га

Параметр	2020 год		2021 год	
	Стандарт	Оптимизация	Стандарт	Оптимизация
Оросительная норма, м ³ /га	1600	1570	1600	1490
Экономия, м ³ /га		30		110

6.7 Результаты исследований влияния рельефа местности на характеристики машины и качественные показатели полива

Для агротехнической оценки была выбрана дождевальная машина «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) длиной 487,3м расходом 66,8 л/с, работающая на наиболее сложном рельефе. За нулевую отметку принимался уровень плиты центральной опоры. Тип почвы–темно-каштановый суглинок.

Положительный средний уклон в секторе 1 равен +0,03. Максимальный +0,057. В секторе 2 отрицательный средний уклон равен –0,012. Минимальный – 0,038. Сектор 3 – со средним уклоном – 0,003. Дождеватели с диаметром сопла от 3 мм до 14 мм установлены через 3,5 м.

Соотношения нормы полива и скорости движения машины представлены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Соотношения нормы полива и скорости движения машины

Норма полива, м ³ /Га	Скорость тележки, м/мин	ход, с	пауза, с	ход, %	пауза, %
50	1,378	48,7	11,3	81	19
150	0,689	24,4	35,6	41	59
250	0,344	12,2	47,8	20	80
350	0,230	8,2	51,8	14	86
450	0,172	6,1	53,9	10	90
550	0,138	4,9	55,1	8	92
650	0,115	4,1	55,9	7	93
		0	60	0	100

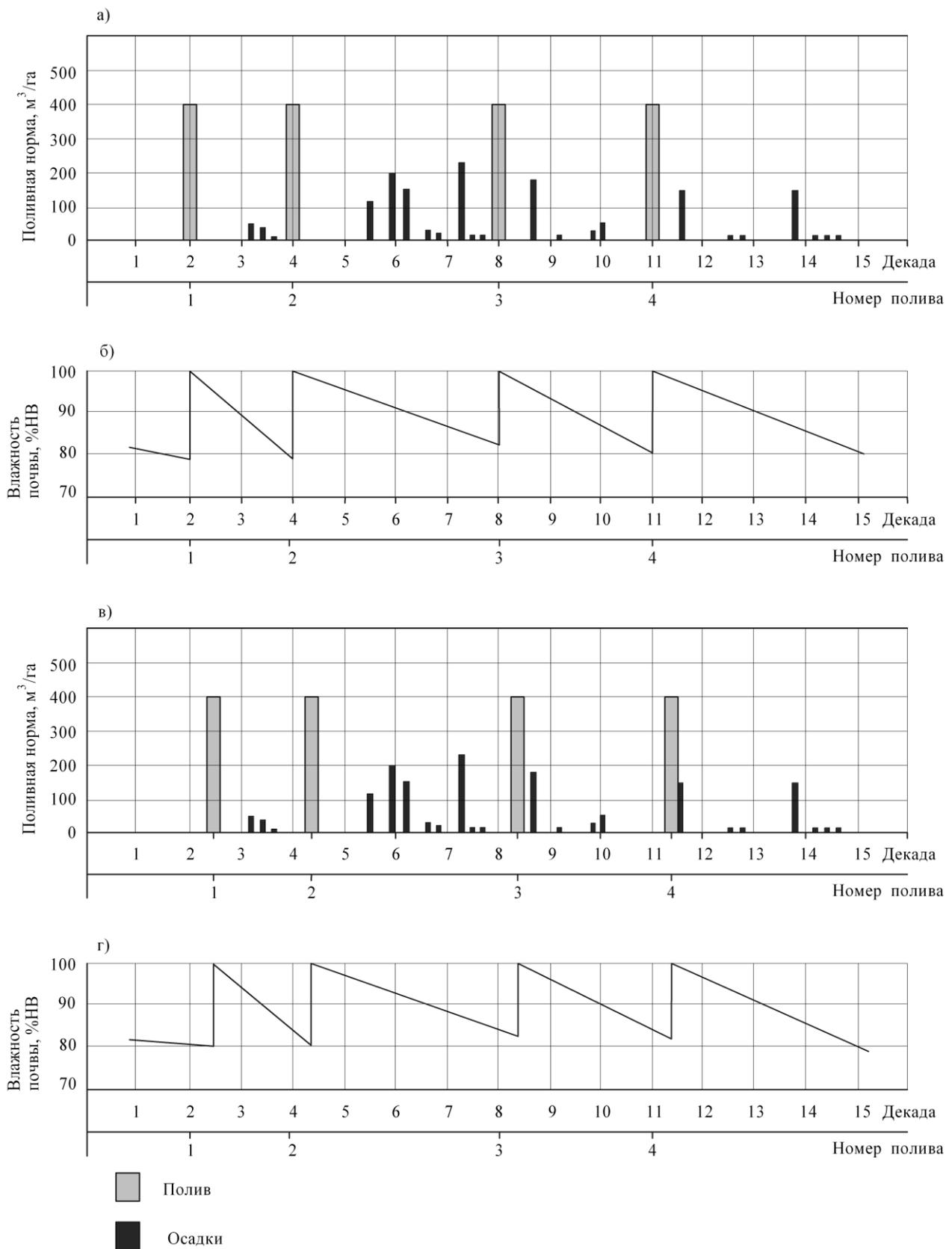


Рисунок 6.24– Режим внесения поливной нормы и динамика влажности почвы при поливе по стандартной технологии, 2020 год: а, б – начало первого сектора; в, г – конец последнего сектора

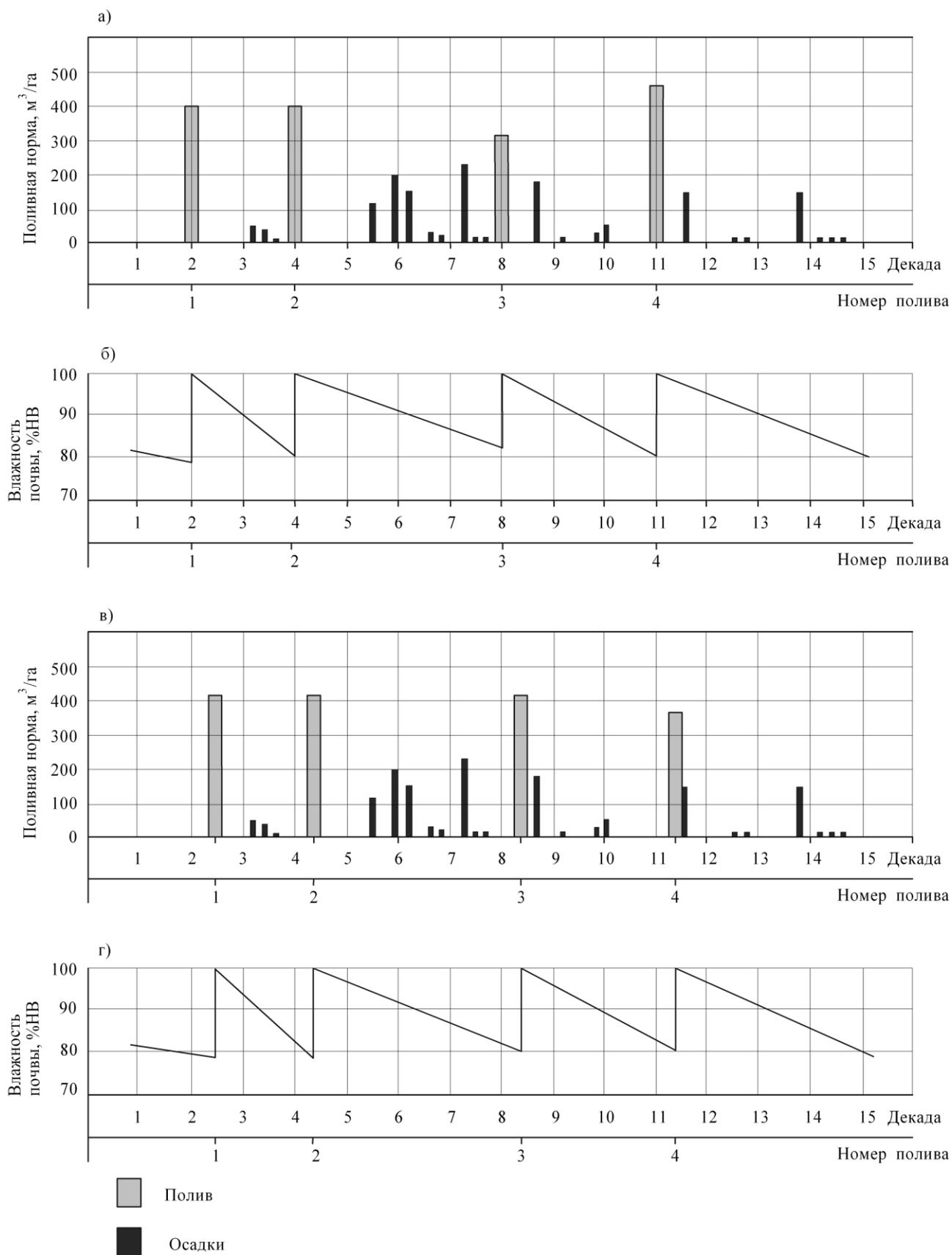


Рисунок 6.25 –Режим внесения поливной нормы и динамика влажности почвы, при поливе по предлагаемой технологии, 2020 год: а, б – начало первого сектора; в, г – конец последнего сектора

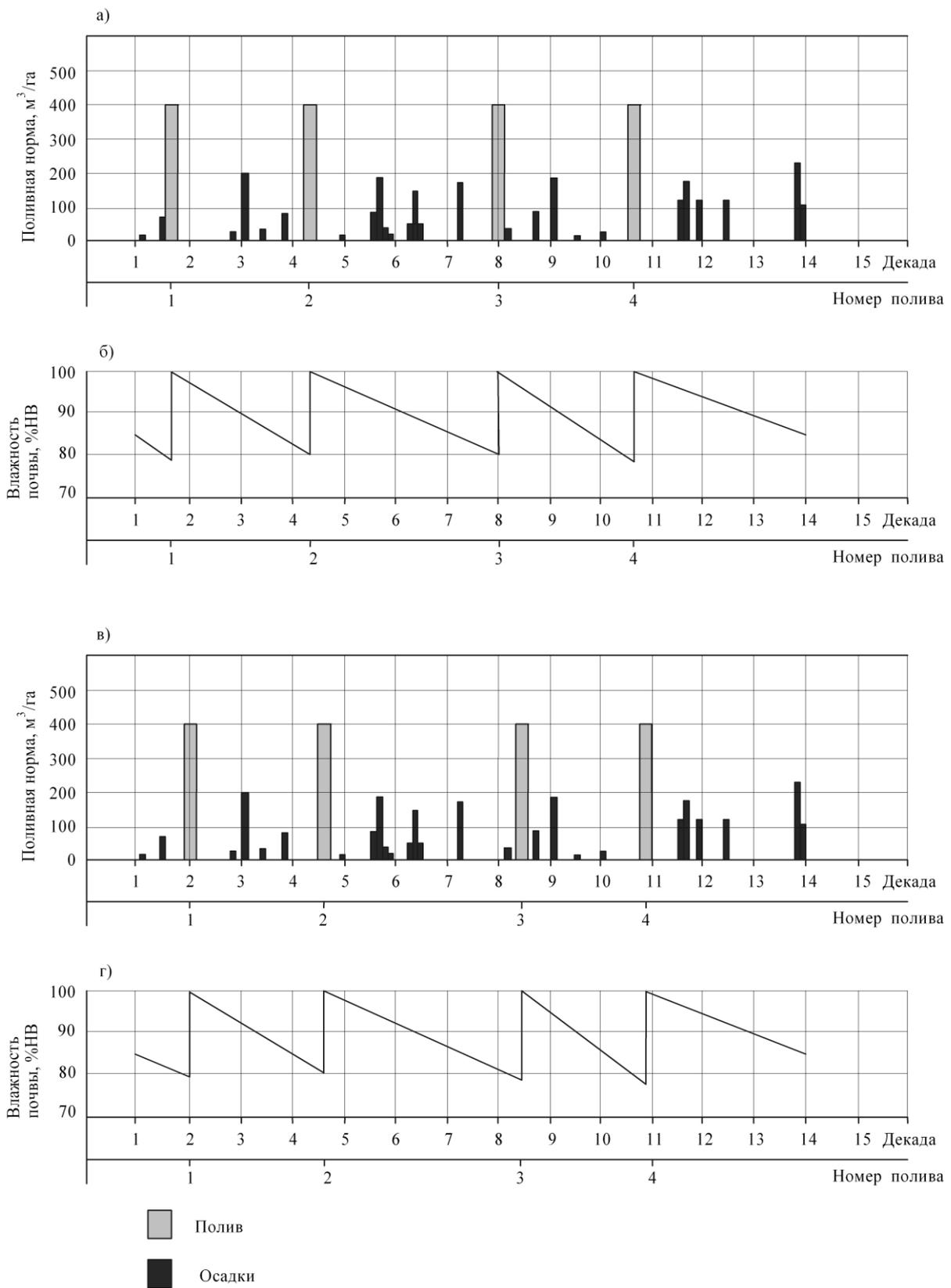


Рисунок 6.26 – Режим внесения поливной нормы и динамика влажности почвы, при поливе по стандартной технологии, 2021год: а, б – начало первого сектора; в, г –конец последнего сектора

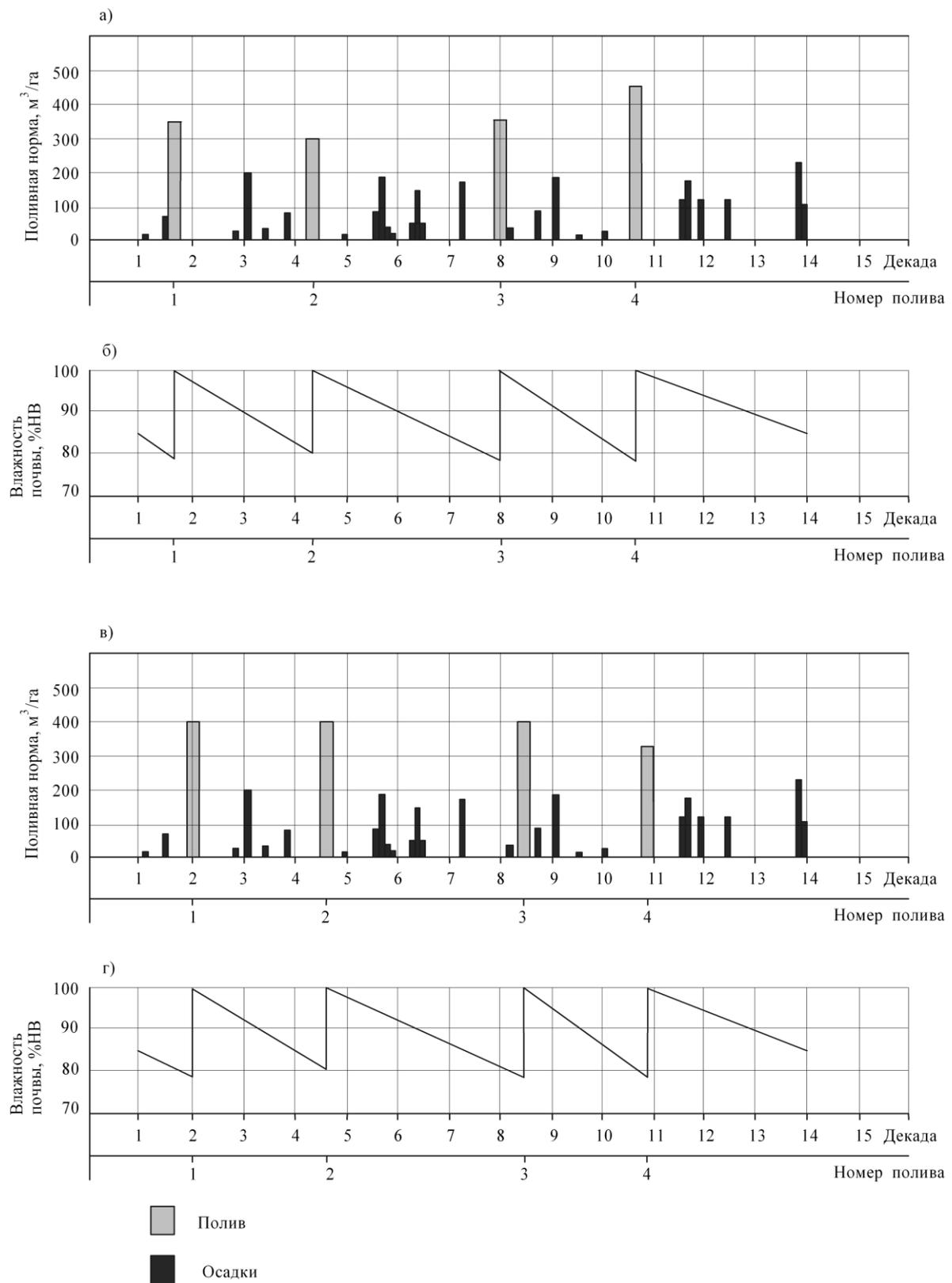


Рисунок 6.27 – Режим внесения поливной нормы и динамика влажности почвы, при поливе по предлагаемой технологии за 2021 г: а, б – начало первого сектора; в, г – конец последнего сектора

Распределение слоя осадков вдоль водопроводящего трубопровода в каждом секторе определялось на режимах движения 41 и 20%.

При этом фиксировались метеоусловия (табл. 6.5), определялись гидравлические параметры потока в водопроводящем трубопроводе дождевальной машины и режимные характеристики (табл.6.6).

Таблица 6.5– Метеоусловия при исследовании работы ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)

Сектор полива	Режим движения, %	Ветер		Относительная влажность воздуха, %	Температура воздуха, °С
		направление	скорость, м/с		
1	41	встречный	3,5	60	27
	20	встречный	2,5	55	26
2	41	попутный	2,5	48	25
	20	переменный	1,2	48	27
3	41	переменный	до 0,6	46	29
	20	переменный	до 0,6	45	26

Таблица 6.6 –Гидравлические и кинематические параметры ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)

Сектор полива	Режим движения, %	Скорость последней тележки, м/мин	Давление по водопроводящему трубопроводу, МПа		
			начало	середина	конец
1	41	0,67	0,39	0,25	0,15
	20	0,31	0,38	0,24	0,14
2	41	0,68	0,35	0,30	0,28
	20	0,35	0,36	0,30	0,30
3	41	0,67	0,35	0,27	0,24
	20	0,32	0,35	0,27	0,24

Как показывает анализ полученных данных, существенное значение оказывает рельеф местности на распределение давления по водопроводящему трубопроводу машины. Минимальные значения давления 0,24-0,25 МПа в середине водопроводящего трубопровода дождевальной машины на положительном уклоне в первом секторе. Также как и в конце трубопровода, минимальное давление 0,13-0,15 МПа соответствует первому сектору полива. Максимальное давление 0,30-0,31 МПа во втором секторе полива на отрицательном уклоне в середине водопроводящего трубопровода и, соответственно 0,28-0,30 МПа у консоли.

Проведенные эксперименты показывают, что при минимальной скорости движения (режим 20%) наибольший слой осадков – до 50 мм во втором секторе

с отрицательным уклоном, а наименьшие – около 25 мм в первом секторе полива с положительным уклоном (рис. 6.28).

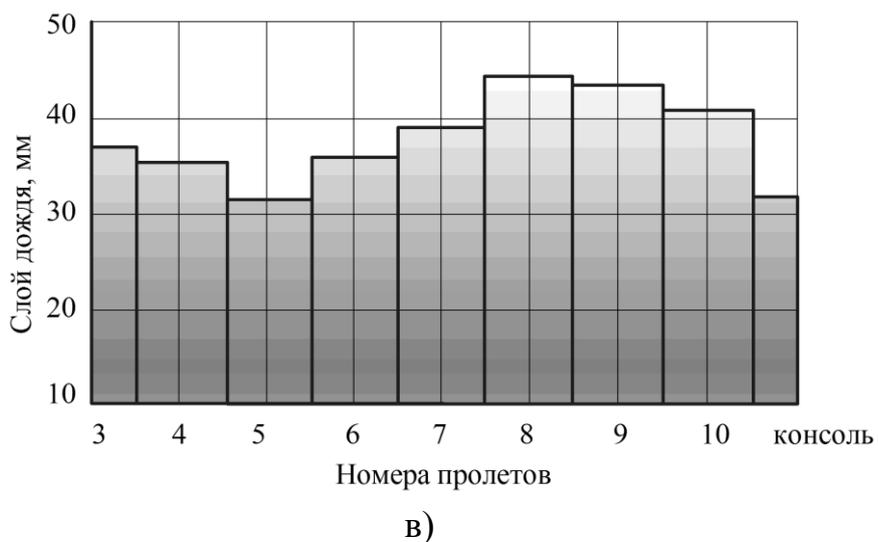
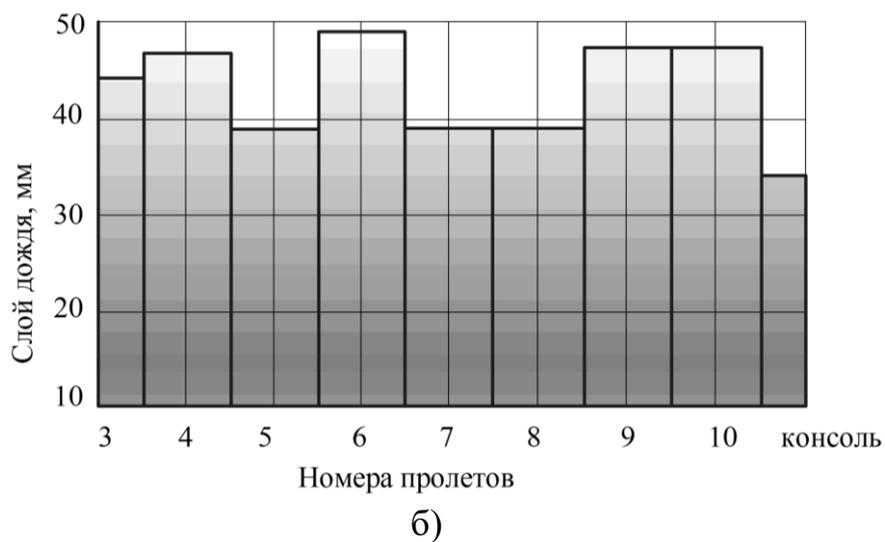
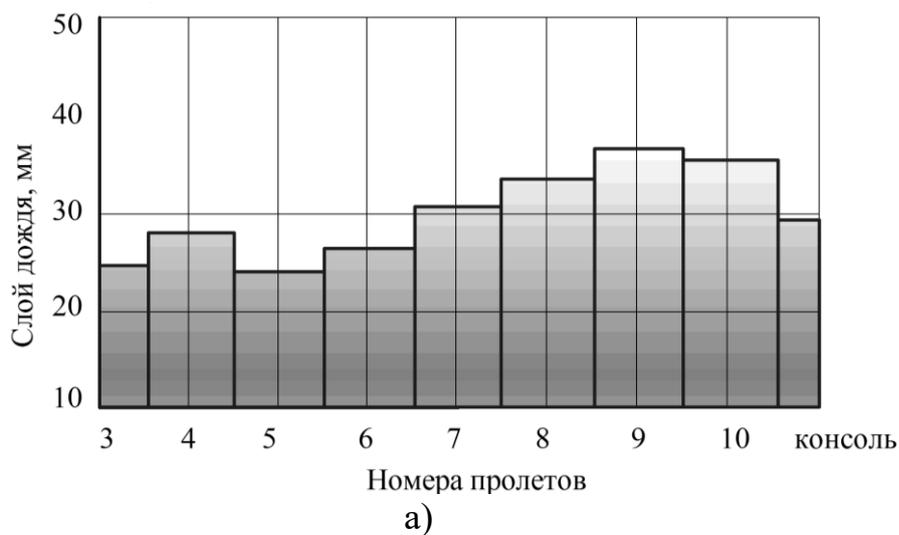
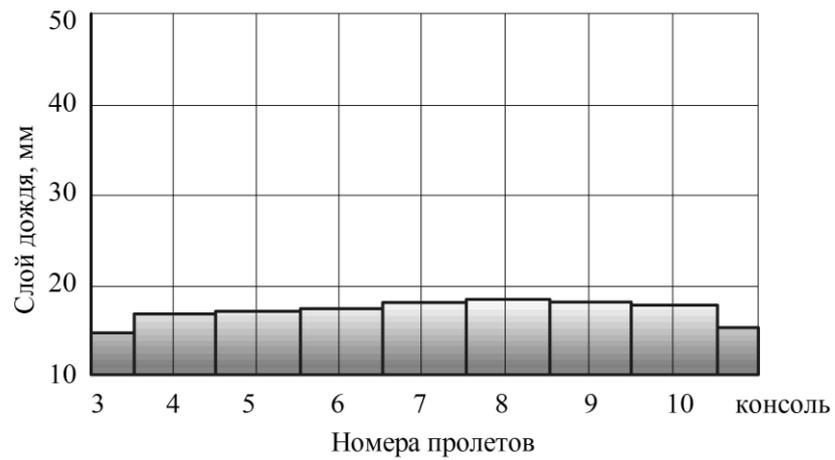
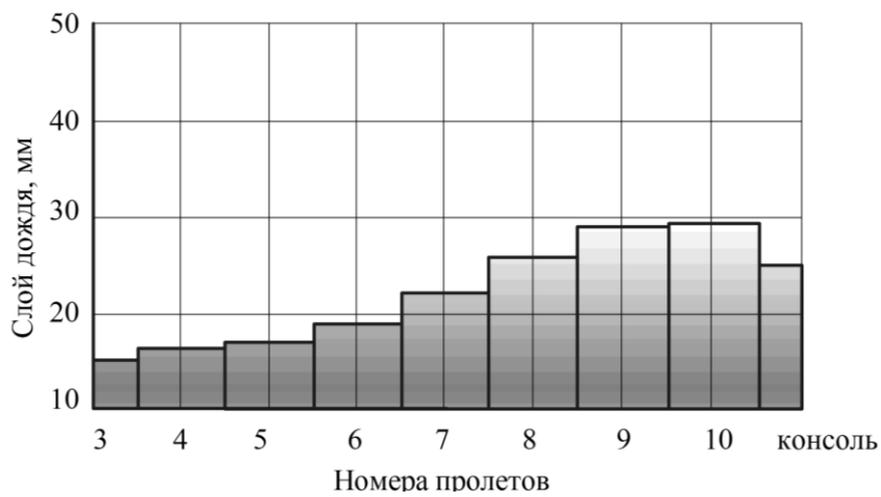


Рисунок 6.28– Распределение слоя дождя под пролетами ДМ «Кубань-ЛК1М» (Каскад): а) 1 сектор 20%; б) 2 сектор 20%; в) 3 сектор 20%;

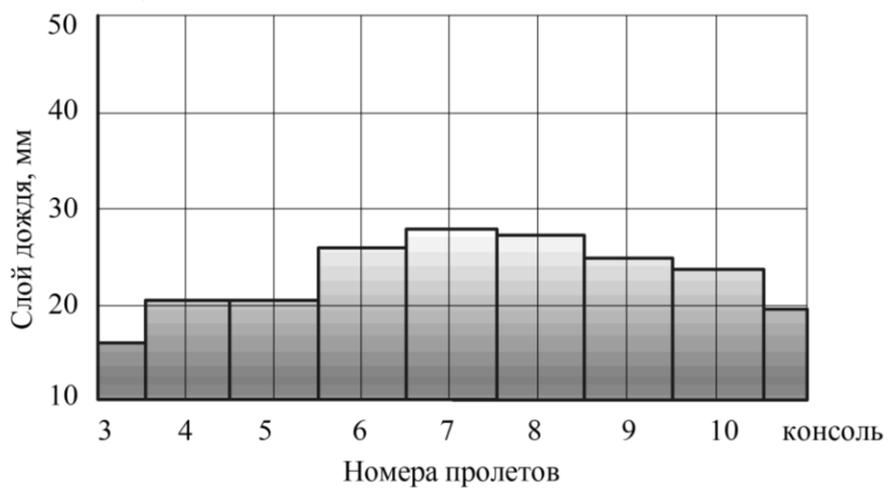
При большей скорости движения и меньших поливных нормах (режим 41%) разброс значений определяется в меньших границах от 16,5 до 22 мм (рис. 6.29).



а)



б)



в)

Рисунок 6.29– Распределение слоя дождя под пролетами ДМ «Кубань-ЛК1» а) 1 сектор 41%; б) 2 сектор 41%; а) 3 сектор 41%;

Для определения качества полива исследовалось влияние уклонов на коэффициент эффективного полива в зависимости от режима движения машины (табл. 6.5).

Таблица 6.5 – Показатели качества полива круговыми ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)

Номер сектора	Режим движения	Показатели			
		Средний слой дождя, мм	$K_{ЭФ}$	$K_{НЕД}$	$K_{ИЗБ}$
1	41	16,5	0,70	0,19	0,11
	20	30,0	0,73	0,15	0,12
2	41	22,0	0,66	0,19	0,15
	20	43,0	0,74	0,18	0,08
3	41	21,0	0,75	0,19	0,08
	20	37,0	0,72	0,20	0,08

Представленные данные показывают значительные колебания значений $K_{ЭФ}$ по всем трем секторам. Коэффициент эффективности полива $K_{ЭФ}$ зависит от рельефа и скорости движения машины, причем, при больших положительных уклонах влияние скорости перемещения на коэффициент эффективного полива незначительно.

В целом можно отметить, что при работе на склоновых участках коэффициенты эффективного полива чуть меньше или соответствует допустимым значениям и при отсутствии регуляторов имеют приемлемую равномерность распределения дождя.

Однако следует отметить большой разброс значений слоя дождя в зависимости от значений уклонов и скорости движения машины. Чем меньше скорость движения машины (больше норма полива), тем разброс значений больше, поэтому при эксплуатации большие поливные нормы, выдаваемые за один оборот нежелательны.

Следовательно, норма полива более 300 м³/га на уклонных участках требует установки регулирующих устройств, либо применения режима выдачи поливной нормы за несколько проходов.

Для повышения равномерности полива на ДМ «КАСКАД» длиной 456,7м расходом 62,6 л/с, давлением 0,24МПа и с частотой расположения дождевателей через 2,9 м устанавливались дождеватели «КАСКАД» с регуляторами давления марки Senninger [11].

Положительный средний уклон в секторе 1 составлял +0,038. В секторе 2 отрицательный средний уклон равен – 0,028. Сектор 3 был выбран со средним уклоном – 0,004.

Результаты экспериментальных исследований показывают достаточно ровные значения слоя дождя и увеличение коэффициента эффективности полива, табл. 6.6.

Таблица 6.6–Показатели качества полива круговыми ДМ «КАСКАД»

Номер сектора	Режим движения	Показатели			
		Слой дождя, мм	КЭФ	КНЕД	Кизб
1	40	18,5	0,73	0,11	0,16
	20	32,8	0,81	0,10	0,09
2	40	22,0	0,77	0,10	0,13
	20	38,4	0,83	0,10	0,07
3	40	20,0	0,84	0,10	0,06
	20	35,0	0,86	0,07	0,07

Т.о. повышение равномерности полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия на уклонных землях при подаче больших норм полива за один проход обеспечивается установкой дождевателей по учащенным схемам через 2,9м с регуляторами давления.

7 ВЫБОР ПАРАМЕТРОВ ПО СИСТЕМЕ «НОРМА ПОЛИВА-ПОЧВА-ДОЖДЕВАЛЬНАЯ МАШИНА»

В настоящее время производители ДМ часто увеличивают длину пролета, это связано в первую очередь со снижением общей себестоимости конструкции, поскольку значительная часть расходов связана с эксплуатационными затратами ходовых тележек (привод и ходовое оборудование).

Предлагаемая упрощенная система выбора основных параметров машины или ее модели представлена на рисунке 7.1.

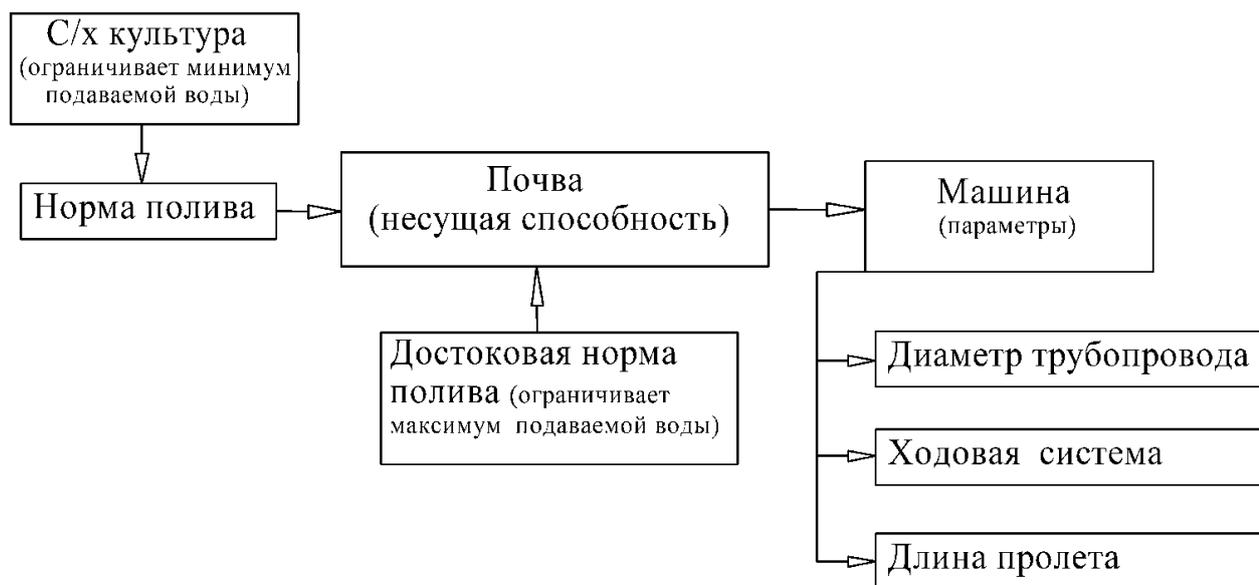


Рисунок 7.1 – Система «норма полива-почва-дождевальная машина»

Выращиваемая сельскохозяйственная культура задает необходимую норму полива. И определяет тот минимум воды, который нужен для роста и развития растений, меньше которого полив не целесообразен.

Второй элемент системы – почва, обладающая определенными характеристиками и определяющая достоковую норму. Величина достоковой нормы также является ограничением, только уже максимального значения поданной воды.

Норма полива позволяет задать расход, требуемый для подачи, соответственно и диаметр водопроводящего трубопровода машины.

Почва в своем увлажненном состоянии определяет несущую способность, которая является определяющим критерием.

Зная норму полива и несущую способность почвы следует выбрать верное соотношение длины пролета и оптимального ходового оборудования, рисунок 7.2.

В случае возникновения вариантов выбора, проверка осуществляется по критерию проходимости, т.е. учитывается уклон местности. В случае уклона следует выбирать вариант с меньшей длиной пролета или трехколесной системой или ходовыми системами шинами большей ширины.

Упрощенная схема оценки эксплуатационных затрат ходовых систем

представлена на рисунке 7.3, соответственно в виде полученных гистограмм, рисунки 7.4.

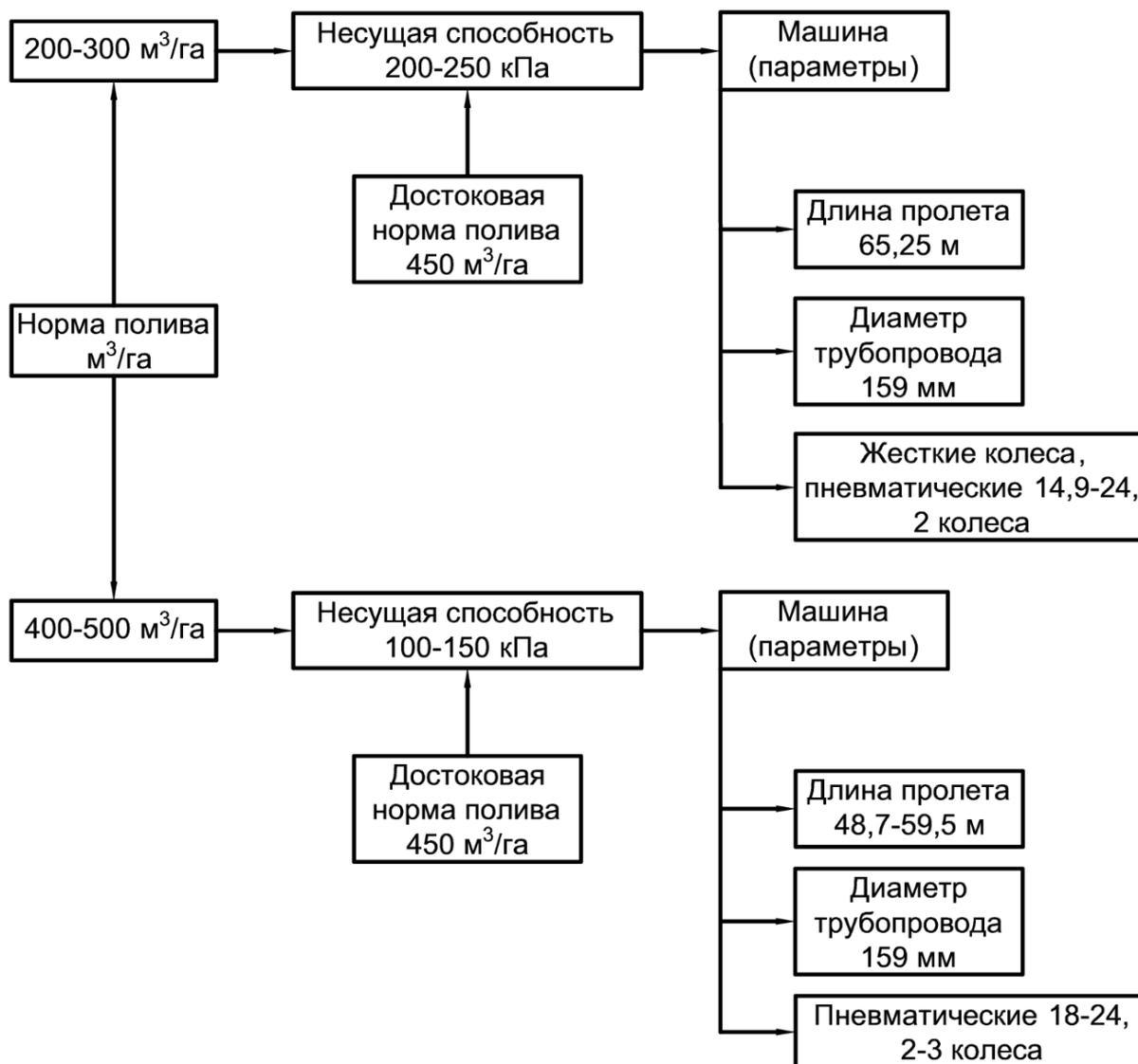


Рисунок 7.2 – Выбор параметров по системе «норма полива-почва-дождевальная машина»

Оценка эксплуатационных затрат ходовых систем показывает, что при практически одинаковых показателях проходимости цена при установке трех колес значительно возрастает, даже без учета затрат дополнительных элементов металлоконструкции и привода.

Для двухколесной системы при поливе нормой $300 \text{ м}^3/\text{га}$ – рекомендуемые шины 14,9-24 для пролетов длиной 48,7; 59,5 и 65,25 м. Затрата которых составляет 45 тыс. руб., рисунок 7.5.

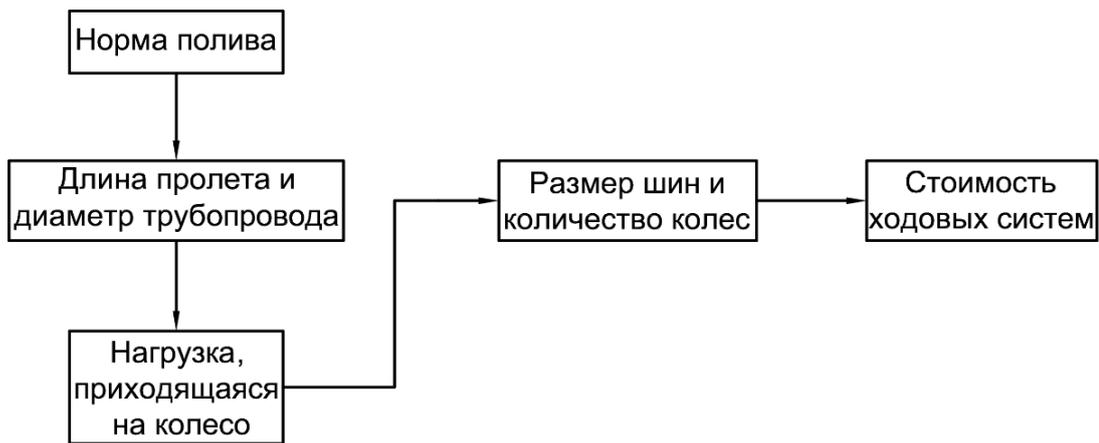
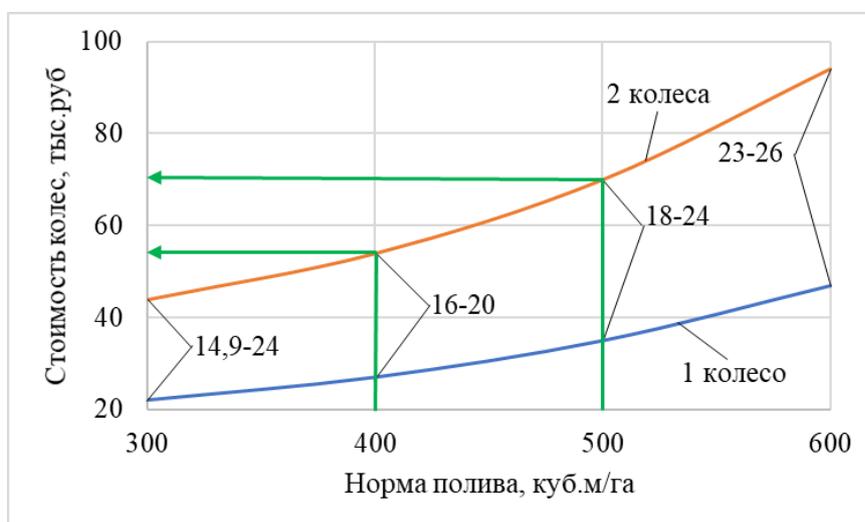
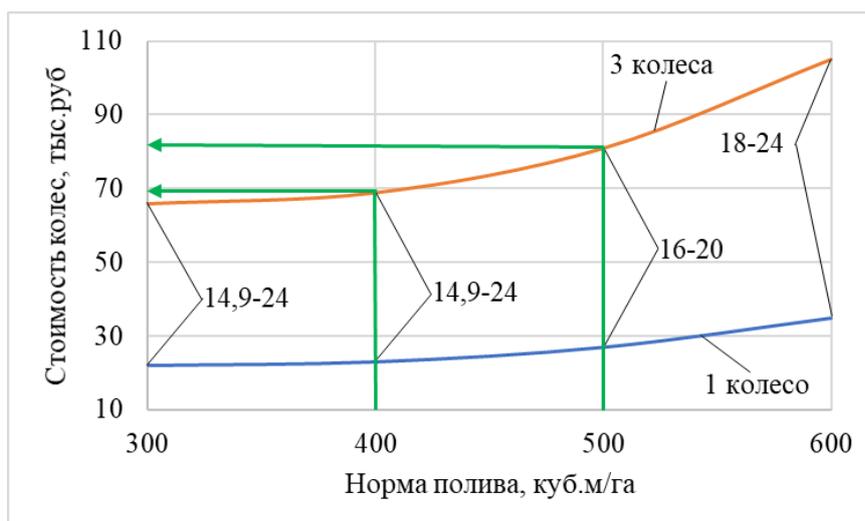


Рисунок 7.3 – Упрощенная схема оценки эксплуатационных затрат ходовых систем



а



б

Рисунок 7.4 – Гистограмма определения эксплуатационных затрат ходовых систем в зависимости от типа и количества колес: а – двухколесная система, б – трехколесная система

При поливе $400 \text{ м}^3/\text{га}$ – рекомендуемые шины для пролета $48,7 \text{ м}$ – 14,9-24, при увеличении пролета свыше 55 м – 16-20, а при длине пролета выше 62 м – 18-24, что показывает резкое увеличение затраты колес, соответственно и затраты машины.

При норме полива выше $500 \text{ м}^3/\text{га}$, обеспечение проходимости машины требует установки шин марок 16-20 уже для пролета $48,7 \text{ м}$, 18-24 для пролета $59,5 \text{ м}$ и 23-26 для пролета $65,25 \text{ м}$.

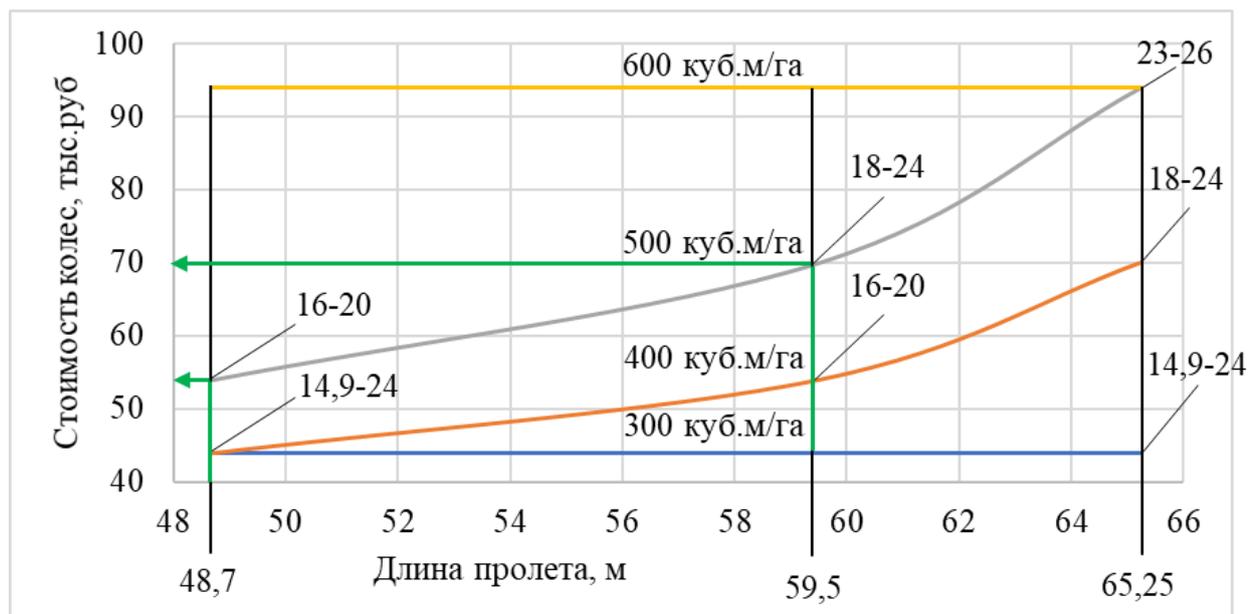


Рисунок 7.5 – Определение эксплуатационных затрат колес в зависимости от рационального соотношения рекомендуемых длин пролетов, шин и норм полива для двухколесной системы

Соответственно для нормы полива $600 \text{ м}^3/\text{га}$ рекомендуемые шины 23-26 для всех величин пролетов, что значительно увеличивает затраты всей системы.

Для трехколесных систем при норме полива $300-400 \text{ м}^3/\text{га}$ и всей длине пролетов рекомендуемые шины – 14,9-24, рисунок 7.6.

При норме полива $500 \text{ м}^3/\text{га}$ – рекомендуемые шины – 16-20 для всех величин пролетов.

При норме пролива $600 \text{ м}^3/\text{га}$ и более применяются шины 18-24 для длины пролета меньше $59,5 \text{ м}$ и 23-26 при длине пролета больше $59,5 \text{ м}$, что, также учитывая ценовой фактор менее рационально.

Рациональность применения трехколесных систем определяется только не возможностью обеспечения параметров проходимости двухколесных тележек.

Т.о. предлагаемая упрощенная система выбора основных параметров машины или ее модели по системе «норма полива-почва-дождевальная машина» позволяет выбрать основные параметры машины на основе нормы полива и несущей способности почвы. Уточнение и выбор возникших вариантов осуществляется по критерию проходимости.

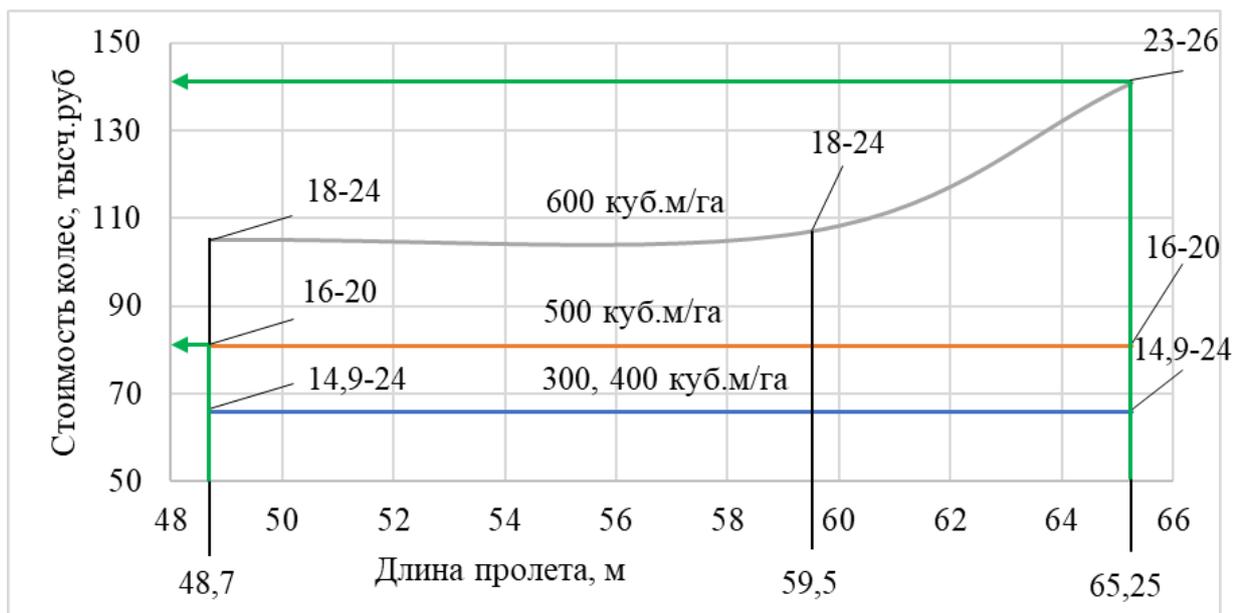


Рисунок 7.6 – Определение эксплуатационных затрат колес в зависимости от рационального соотношения рекомендуемых длин пролетов, шин и норм полива для трехколесной системы

Оценка эксплуатационных затрат ходовых систем показывает, что при практически одинаковых показателях проходимости цена при установке трех колес значительно возрастает, даже без учета затрат дополнительных элементов металлоконструкции и привода.

Рациональность применения трехколесных систем определяется не возможностью обеспечения параметров проходимости двухколесных тележек.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработка, производство и внедрение в хозяйственный оборот АПК поливной техники нового поколения с более высокими технико-эксплуатационными показателями, широким использованием автоматизации систем управления и информационных технологий, является основой вывода орошаемого земледелия на необходимые объемы производства отечественного продовольствия и его конкурентоспособности.

Повышение технического уровня дождевальных машин требует повышения производительности, расширения функций систем автоматизации и управления, совершенствования технологий орошения, обеспечивающих рациональное использования воды и энергии, максимальной адаптации технологий полива к региону применения, обеспечения экологической безопасности, сохранения и повышения плодородия орошаемых почв.

Главными показателями качества работы служат равномерность распределения воды по орошаемой площади без образования поверхностного стока и сохранение структуры почвы, а также динамическое воздействие капель искусственного дождя на почву и растения.

Повышение качества полива также обеспечивается путем изменения поливной нормы в соответствии с уровнем влагозапасов участков поля на момент их полива, адаптации режима полива к изменяющимся в течение поливного периода условиям, повышения экологической безопасности за счет исключения переполива и водной эрозии почв.

Теоретические и экспериментальные исследования позволили определить конструктивно-технологические параметры дождевателей для различных условий эксплуатации и режимов работы, определить схемы их расстановки вдоль трубопровода для модернизированных и новых образцов дождевальных машин. Максимальный радиус захвата дождем разработанных низконапорных дождевателей при давлении 0,3 МПа составляет 4,5-13 м. Средняя интенсивность дождя изменяется в границах от 0,08 до 1,2 мм/мин.

На основе математического моделирования водопроводящего пояса дождевальных машин был выполнен расчет водопроводящего пояса серии дождевальных машины «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и ДМ «КАСКАД», спроектирован номенклатурный ряд дождеобразующих устройств.

Оборудование модернизированных и новых образцов ДМ низконапорными дождевателями по предлагаемым схемам расстановки обеспечило более качественное распределение слоя осадков по длине машин, что позволило уменьшить переполив под последними пролетами. Средняя интенсивность дождя на новых ДМ равна 0,55 мм/мин при диаметре его капель менее 1 мм. При значительных расходах для повышения равномерности полива рационально применение каскадных дождевателей, для орошения в зонах с повышенным ветровым режимом – дождевателей со стационарным или вращающимися дефлекторами, имеющими

крупные и средние канавки, для щадящего воздействия на почву и растения – дождевателей с дефлекторами, имеющими мелкие канавки.

Сравнение стандартной и предлагаемой технологий полива дождевальными машинами показало, что полив по предлагаемой технологии позволяет осуществлять экономию оросительной воды до 7 %.

Анализ работы машин на пересеченном рельефе и уклонах выявил, что чем меньше скорость движения машины (больше норма полива), тем разброс значений слоя осадков больше, поэтому при эксплуатации большие поливные нормы, выдаваемые за один оборот нежелательны. Норма полива более 300 м³/га на уклонных участках требует установки регулирующих устройств, либо применения режима выдачи поливной нормы за несколько проходов. Проведенные исследования подтверждают уменьшение фактической скорости движения на 9,5-13,6%, причем с увеличением поливной нормы эта разница увеличивается. Уменьшение скорости приводит к увеличению нормы полива на 7-10,5% , перерасходу воды и повышению вероятности возникновения водной эрозии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдразаков Ф.К. Рациональное снижение металлоемкости при конструировании широкозахватных дождевальных машин / Ф.К. Абдразаков, Л.А. Журавлева, В.А. Соловьев // Аграрный научный журнал. – 2018. – №5. – С. 37-42.
2. Абрамов А. М. Методы определения эрозионно допустимых поливных норм при дождевании: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1987. – 18 с
3. Альтшуль А.Д. Гидравлика и аэродинамика / А.Д. Альтшуль. – М.: Стройиздат, 1987. – 416 с.
4. Альтшуль А.Д. Гидравлические потери на трение в трубопроводах / А.Д. Альтшуль. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1985. – 256с.
5. Анализ рынка дождевальной и поливной техники в России в 2009-2014 гг. Прогноз на 2014-2018 г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: // http://businessstat.ru/russia/engineering/farm_equipments/.
6. Башта Т.М. Гидравлика, гидромашин и гидроприводы. / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов. – М.: Машиностроение, 1982. – 423 с.
7. Бородин В. А. Распыливание жидкостей / В.А. Бородин. – М.: Машиностроение, 1967. – 262 с.
8. Ведомственная целевая программа: «Развитие мелиоративных систем общего и индивидуального пользования в Саратовской области на 2012 –2014 годы» // Министерство сельского хозяйства саратовской области. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mcx.ru/documents/document/v7_show/22146.htm.
9. Гаврилица О. А. Эрозионная деградация черноземов при поливе дождеванием и пути ее предупреждения: Автореф. дис. д-ра техн. наук. – Кишинев, 1991. – 48 с.
10. ГОСТ 28268-89 Почвы. Методы определения влажности, максимальной гигроскопической влажности и влажности устойчивого завядания растений. – М.: Стандартинформ, 2006. – 8с.
11. ГОСТ 24059–88. Техника сельскохозяйственная. Методы эксплуатационно-технической оценки транспортных средств на этапе испытаний. – М.: Стандартинформ, 1988. – 48с.
12. ГОСТ ИСО 11545-2004. Оборудование сельскохозяйственное оросительное, машины дождевальные кругового и поступательного действия с дождевальными аппаратами или распылителями. Определение равномерности орошения. – М.: Стандартинформ, 2004. – 10с.
13. ГОСТ ИСО 8224-1-2004. Машины дождевальные подвижные. Часть 1. Эксплуатационные характеристики и методы лабораторных и полевых испытаний. – М.: Стандартинформ, 2004. – 29с.
14. Губер К.В. Дождевальные машины и их применение / К.В. Губер. Россельхозиздат, 1975. – 70с.
15. Губер К. В. Ресурсосберегающие технологии и конструкции оросительных систем при дождевании: дис. д-ра техн. наук.– М., 2000. – 518с.

16. Гусейн-заде С.Х. Многоопорные дождевальные машины / С.Х. Гусейн-заде, Л.А. Перевезенцев, В.И. Коваленко, Л.Г. Луцкий. – М.: Колос, 1984. –191 с.
17. Данные организации Росстат. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mcx.ru/document_show/25438.
18. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы обработки данных. Том.1,2 / Пер. с англ. Н. Джонсон, Ф. Лион. – М.: Мир, 1980. – 510 с.
19. Дитякин Ю.Ф. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А. Клячко, Б.В. Новиков и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 208с.
20. Дождевальная машина «Фрегат»: руководство по эксплуатации ДМ-00.000 РЭ – СССР. – М.: изд. № ЛО-5884/3303. – 136 с.
21. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта/ Б.А. Доспехов. – М.: «УОУО Media», 2012. – 352 с.
22. Есин А.И. Задачи технической механики жидкости в естественных координатах: монография / А.И. Есин. – Саратов: ФГБОУ ВПО СГАУ, 2003.– 144 с.
23. Есин А.И. Численная гидравлика: монография / А.И. Есин.– Саратов: ФГБОУ ВПО СГАУ, 2013. –160 с.
24. Есин А.И. Исследования характеристик потока воды в водопроводящем поясе дождевальной машины / А.И. Есин, Д.А. Соловьев, Л.А. Журавлева // Научная жизнь.– 2018. – № 2 .– С.16-25.
25. Есин А.И. Математическое моделирование водопроводящего пояса дождевальных машин / А.И. Есин, Д.А. Соловьев, Л.А. Журавлева // Научная жизнь. – 2017. – № 9. –С. 20-28.
26. Есин А.И. Обтекание конического дефлектора потоком вязкой несжимаемой жидкости / А.И. Есин, Д.А. Соловьев, А.А. Акпасов, Л.А. Журавлева // Научная жизнь. – 2018. – № 4. – С.14-19.
27. Есин А.И. Рекомендации по выбору дождевателей «Каскад» для дождевальных машин / Мелиорация и водное хозяйства. – 2018. – №2. –С. 16-22.
28. Журавлева Л.А. «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) – Российская дождевальная машина нового поколения / Л.А. Журавлева, А.С. Попов // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении. Матер. Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2016. – С. 123-130.
29. Журавлева Л. А. Ресурсосберегающие широкозахватные дождевальные машины кругового действия: дис. ... д.-ра. техн. наук. – Саратов, 2018. – 347 с.
30. Информационное письмо департамента мелиорации Министерства сельского хозяйства РФ. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.chamsaurapivot.chamsa-ur-389753.htm 2016.
31. Исаев А.П. Гидравлика дождевальных машин / А.П. Исаев. – М.: Машиностроение, 1973. – 214 с.
32. Каталог BAUER. Самая эффективная система под солнцем [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.bauer-at.com.

33. Каталог ирригационной продукции Zimmatic by Lindsay [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.lindsay.com.
34. Каталог. I-Wob Senninger. Дождеватель для механизированного орошения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.senninger.com
35. Каталог. Отличительные особенности ирригационных машин Reinke [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.reinke.com
36. Каталог T-L Irrigation Company sales@tlirr.com [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.tlirr.com
37. Каталог продукции Valley [Электронный ресурс]. – Режим доступа: / www.valmont.com/irrigation
38. Каталог широкозахватных дождевальнх машин, ирригационного оборудования, систем капельного орошения и насосных станций Российского производства. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации. Департамент мелиорации. ФГБНУ ВНИИ «Радуга» – 2016.
39. Каталог продукции RAIN HUNTER. Системы автополива [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://rainhunter.ru> – (Дата обращения 30.01.2018).
40. Каталог продукции Rain Bird [Электронный ресурс]. – Режим доступа: / www.rainbird.com.
41. Кеита Шейк Ахмед Тидиан. Обоснование широкозахватных дождевальнх машин на пойменных землях: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1996. – 25 с.
42. Колганов А.В. Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения в России: монография / А.В. Колганов, Н.А. Сухой, В.Н. Шкура, В.Н. Щедрин; под ред. Щедрина.– Новочеркасск: РосНИИПМ, 2016. –222с.
43. Концепция федеральной целевой программы «Развитие мелиорации земель сельскохозяйственного назначения России на 2014–2020 годы». – М., 2010. – 60 с.
44. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем / С.С. Кутателадзе, М.А. Стырикович. – М.: Энергия, 1976. – 296с.
45. Ларионова А. М. Впитывающая способность почв при поливе дождеванием: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2004. – 39 с.
46. Лебедев Б.М. Дождевальнх машины / Б.М. Лебедев. – М.: Машиностроение, 1965. – 225с.
47. Маккавеев В.М. Гидравлика / В.М. Маккавеев, И.М. Коновалов. – М.-Л.: Речиздат, 1940. – 643с.
48. Мелиоративные системы и сооружения: СНИП 2.06.03-85 / Гостстрой СССР. –М., 1986. -60с.
49. Ольгаренко Г.В. Ресурсосберегающие эффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения. Справочник. / Г.В. Ольгаренко, В.И. Городничев, А.А. Алдошкин [и др.]. – М.: ФГБНУ «Росинформгротех», 2015. – 264 с.

50. Пажи Д. Г. Распыливатели жидкости / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
51. ПД 100-00-000 СБ. Дождевальная машина электрифицированная круговая «Кубань – ЛК1М» (КАСКАД). Обоснование безопасности. – Саратов, 2016. – 30с
52. Петров Г.А. Гидравлика переменной массы: монография / Г.А. Петров.– Харьков: Изд-во Харьковского ун-та, 1964. – 224 с.
53. Протокол сертификационных испытаний дождевальной машины электрифицированной круговой «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) №37-19-2016 от 3 августа 2016. – Кинель: Поволжский Агротех Тест Центр, 2016. – 32 с.
54. Протокол приемочных испытаний дождевальной машины электрифицированной круговой «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) №08-11П-2016 от 11 ноября 2016. – Кинель: ФГБУ «Поволжская государственная зональная машиноиспытательная станция», 2016. – 65 с.
55. Рекомендации по научно обоснованным технологиям орошения сельскохозяйственных культур кукурузы на зерно, картофеля, лука и моркови современными стационарными широкозахватными круговыми и фронтальными дождевальными машинами Reinke и Valley в условиях центральной орошаемой зоны Ростовской области / под ред. Н.А. Иванова; Новочерк. гос. мелиор. акад. –Новочеркасск, 2013. –30 с.
56. Руководство по эксплуатации ЭК-100.000РЭ. Машина дождевальная электрифицированная круговая «Кубань-ЛК1». Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкции ЭК-100.000РЭ. СКБ ДМ «Дождь» – М., 1991. – 99с.
57. Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкции. Машина дождевальная электрифицированная круговая «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД). – Саратов, 2016. – 121с.
58. Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкции. Машина дождевальная электрифицированная круговая КАСКАД. – Саратов, 2017. – 133с.
59. Рыжко Н. Ф. Ресурсосберегающие технологии и технические средства полива многоопорными дождевальными машинами в условиях Саратовского Заволжья: дис. ... д-ра. техн. наук. – Саратов, 2010. – 366 с.
60. Рыжко Н. Ф. Совершенствование поливной техники и повышение качества дождя на примере низконапорной ресурсосберегающей дождевальной машины «Фрегат»: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2002. – 166 с.
61. Рязанцев А.И. Механико-технологическое обоснование, создание и внедрение многоопорных дождевальных машин с поливом в движении по кругу для сложных почвенно-рельефных условий: дис. ...д-ра техн. наук. – Рязань, 1994. – 253с.
62. Рязанцев А.И. Техничко-эксплуатационные особенности многоопорной электрифицированной дождевальной машины нового поколения «Кубань-ЛК1»

/ А.И. Рязанцев, А.О. Антипов / Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2016. – № 2. – С. 83-87.

63. Слюсаренко В.В. Машины и оборудование для орошения сельскохозяйственных культур / В.В. Слюсаренко, А.В. Хизов, А.В. Русинов, Д.А. Соловьев и др. Учебное пособие для студентов специальности -190207 «Машины и оборудование природообустройства и защиты окружающей среды», ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ» Саратов, 2011-с.161.

64. Снопич Ю.Ф. Интенсификация технологий и совершенствование технических средств орошения дождеванием: дис. д-ра техн. наук. – Новочеркасск, 2011. – 340с.

65. Стандарт организации испытаний сельскохозяйственной техники: Машины и установки дождевальные. СТО АИСТ 11.1 –2010. Дата введения – 2011–04–15.

66. СТО АИСТ 001–2010. Агротехническая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2013. – 60 с.

67. СТО АИСТ 11.1–2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2012. – 54 с.

68. СТО АИСТ 003–2010. Экономическая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2013. – 7 с.

69. Технические условия ТУ 4734-002-26833660-2016. Дождевальная машина электрифицированная круговая «Кубань – ЛК1М» (КАСКАД). – Саратов, 2016. – 29 с.

70. Технические условия ТУ 4734-002-26833660-2016. Дождевальная машина электрифицированная круговая КАСКАД. – Саратов, 2017. – 33с.

71. Турапин С.С. Технические средства модернизации дождеобразующего пояса электрифицированных дождевальных машин / С.С. Турапин, А.Н. Жирнов // Природообустройство. – 2011. – №1.–С. 29-33.

72. Федорец А.А. Теоретические основы и методика гидравлического расчета закрытой сети мелиоративных систем с переменным расходом жидкости: дис. ...докт. техн. наук. – Коломна, 1993. – 305 с.

73. Фокин, Б. П. Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин / Б.П. Фокин, А. К. Носов // Научное издание.–Ставрополь, 2011. –80 с.

74. Фокин Б. П. Повышение эффективности полива многоопорными дождевальными машинами: Автореф. дис. д-ра техн. наук.– Ставрополь, 2002. – 52 с.

75. Шевелев Ф.А. Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб / Ф.А. Шевелев, А.Ф. Шевелев.– М.: ООО «БАСТЕТ», 2007. – 336 с.

76. Щедрин В.Н. Оросительные системы России: от поколения к поколению: монография в 2ч. / В.Н Щедрин, А.В Колганов. – Новочеркасск, 2013. – 283с.

77. Штеренлихт Д.В. Гидравлика / Д.В. Штеренлихт. – М.: КолосС, 2004. – 656с.
78. Favre H. Contribution à l'étude des courants liquides / H. Favre. –Zürich. 1933.
79. Hazen A. & Williams G.S. Hydraulic Tables (3rd ed.). New York: John Wiley and Sons, 1920.
80. Hinds I. Side channel Spillways / I. Hinds // Proceedings of the on Society of Civ. Eng., 1926.
81. Solomon K. Trick irrigation uniformity and efficiency / K. Solomon, J. Keller // Journal of the irrigation and drainage division, Proceedings of the American Society of Civil Engenering. № 104, 3. – 1978. – P. 293-306.
82. L. A. Zhuravleva. Studies of Water Flow Parameters in the Water Supply Pipeline of Wide-Reach Sprinklers. TAEE2022. AIP Conf. Proc. 2767, 020010-1–020010-9 (2022).
83. A. A. Skvortsov, L.A. Zhuravleva. Theoretical Foundations of Water-Conducting Belt Design for Wide Coverage Sprinklers Using Numerical Simulation. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 994 (2020).
84. L.A. Zhuravleva, [I. A. Popkov](#). Improving the patency of sprinkler machines on moistened soil on the basis of experimental and theoretical studies of the system irrigation rate-soil-sprinkler machine. [IOP Conference Series Earth and Environmental Science](#) 949(1) (2022).