

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ –
МСХА ИМЕНИ К.А. ТИМИРЯЗЕВА

ЖУРАВЛЕВА ЛАРИСА АНАТОЛЬЕВНА
ПОПКОВ ИГОРЬ АНАТОЛЬЕВИЧ
МАГОМЕДОВ МУРАД САЛМАНДИБИРОВИЧ
ХЕИРБЕИК БАССЕЛ

**ДОЖДЕВАТЕЛИ ШИРОКОЗАХВАТНЫХ
ДОЖДЕВАЛЬНЫХ
МАШИН**

Монография



Москва - 2022

УДК 631
Ж 91

Рецензенты:

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

Н.Ф. Рыжко

Д.т.н., профессор кафедры «Инженерные изыскания, природообустройство и водопользование» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ

А.В. Кравчук

Журавлева Л.А., Попков И.А., Магомедов М.С., Хеирбеик Бассел.
Ж 91 «Дождеватели широкозахватных дождевальными машин»: монография / Л.А. Журавлева, И.А. Попков, М.С. Магомедов, Хеирбеик Бассел – Москва: ФГБОУ ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2022г. –140 с .
ISBN 978-5-00207-025-1

В монографии рассмотрены направления повышения качества полива дождевателями широкозахватных дождевальными машин, совершенствования их конструкций. Дана методика расчета и рекомендации по применимости дождевателей в различных условиях. Оптимизированы конструктивные параметры и режимы работы.

Монография представляет интерес как для фермеров, внедряющих орошение, так и для крупных агрохолдингах, НИИ, предприятий аграрного сектора, предприятий занимающихся конструированием и проектированием техники полива, студентам, магистрам и аспирантам, занятым проектированием оросительных комплексов.

ISBN ISBN 978-5-00207-025-1

УДК 631

© Журавлева Л.А. 2022

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

СОДЕРЖАНИЕ

	стр
ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОЖДЯ. ДОЖДЕВАТЕЛИ.....	6
1.1 Дождеватели.....	6
1.2 Устройства приповерхностного полива.....	26
1.3 Устройства приповерхностного полива.....	29
1.4 Качество полива	32
2 ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДОЖДЕВАТЕЛЕЙ.....	36
2.1 Краткий обзор исследований конструктивных и технологических параметров дождевателей. Направления совершенствования.....	36
2.2 Влияние конструктивно-технологических параметров дождевателей на процесс формирования дождя	38
2.3 Параметры потока после схода с дефлектора.....	57
2.4 Характеристики дисперсности дождевателей. Равномерность полива.....	63
3 КРАТКАЯ ПРОГРАММА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	75
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	93
4.1 Результаты исследований разработанных низконапорных дождевателей.....	93
4.2 Интенсивность. Распределение интенсивности дождя вдоль радиуса захвата дождем.....	100
4.3 Крупность капель дождя при поливе низконапорными дождевателями.....	106
4.4 Расстановка дождевателей на водопроводящем поясе дождевальными машин.....	116
4.5 Результаты исследований широкозахватных дождевальных машин с установленными дождевателями.....	117

4.6	Оценка энергетических показателей при поливе широкозахватными дождевальными машинами с низконапорными дождевателями.....	122
4.7	Норма полива до стока при поливе широкозахватными дождевальными машинами с низконапорными дождевателями.....	126
4.8	Равномерность полива широкозахватными дождевальными машинами, оборудованными низконапорными дождевателями.....	127
5	ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ДОЖДЕВАТЕЛЕЙ НА ШИРОКОЗАХВАТНЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИНАХ «ФРЕГАТ».....	129
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	130
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	131

ВВЕДЕНИЕ

В природно-климатических условиях большинства регионов РФ стабильное развитие сельскохозяйственного производства возможно только при дополнительном к естественной влажности орошении.

Потенциал роста спроса на дождевальную технику велик и будет расти в связи с проведением масштабных работ по вводу мелиорируемых земель.

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.

Независимо от типа и конструкции дождевальной машины или установки дождеватели - неременная составная часть каждой из них. Они выполняют заключительную операцию технологического процесса - распределение воды в виде дождя по орошаемой площади. От качества работы дождевателей зависит качество образующегося дождя, а следовательно и качество всего технологического процесса, выполняемого машиной.

В практике дождевания известно много различных типов дождевателей, характеризующихся различными принципами действия и конструктивными особенностями.

Главными показателями качества работы дождевателя 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.

Создание новой отечественной широкозахватной дождевальной техники, разработка номенклатурного ряда дождевателей для различных условий эксплуатации требует научного обеспечения, разработки и уточнении режимов работы, совершенствования в конструктивном отношении.

1. КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДОЖДЯ.

ДОЖДЕВАТЕЛИ

1.1 Дождеватели

В практике дождевания известно много различных типов дождевателей, характеризующихся различными принципами действия и конструктивными особенностями.

Классифицировать их можно по целому ряду признаков. Широко принято подразделять дождеватели по дальности полета струи на три условные категории:

- коротко,
- средне,
- дальнеструйные.

Это одна из важнейших характеристик. Радиус захвата определяет расстояние между позициями дождевальных машин и оросительных трубопроводов. Следует отметить, что существующая градация весьма относительна.

Другой классификационной характеристикой дождевателей является тип создаваемого потока. В этом случае все дождеватели подразделяются на две группы: веерные и струйные.

К веерным дождевателям относятся создающие широкий веерообразный поток в виде тонкой пленки. Эти дождеватели работают неподвижно на позиции и одновременно орошают всю прилегающую к данной позиции площадь.

К струйным относятся дождеватели, создающие поток воды в виде осесимметричных одной или нескольких струй. При поливе ствол дождевателя вращается вокруг вертикальной оси, благодаря чему обеспечивается угловое перемещение струи и выпадение дождя на площади круга, прилегающего к данной позиции, с радиусом, примерно равным дальности полета струи, называемым радиусом захвата.

Такая классификация определяет общие гидравлические закономерности процесса образования искусственного дождя, рациональна еще и в том отношении, что отвечает конструктивным особенностям дождевателя.

К веерным дождевателям в силу их определения относятся дефлекторные и центробежные насадки (рис. 1.1) [19].

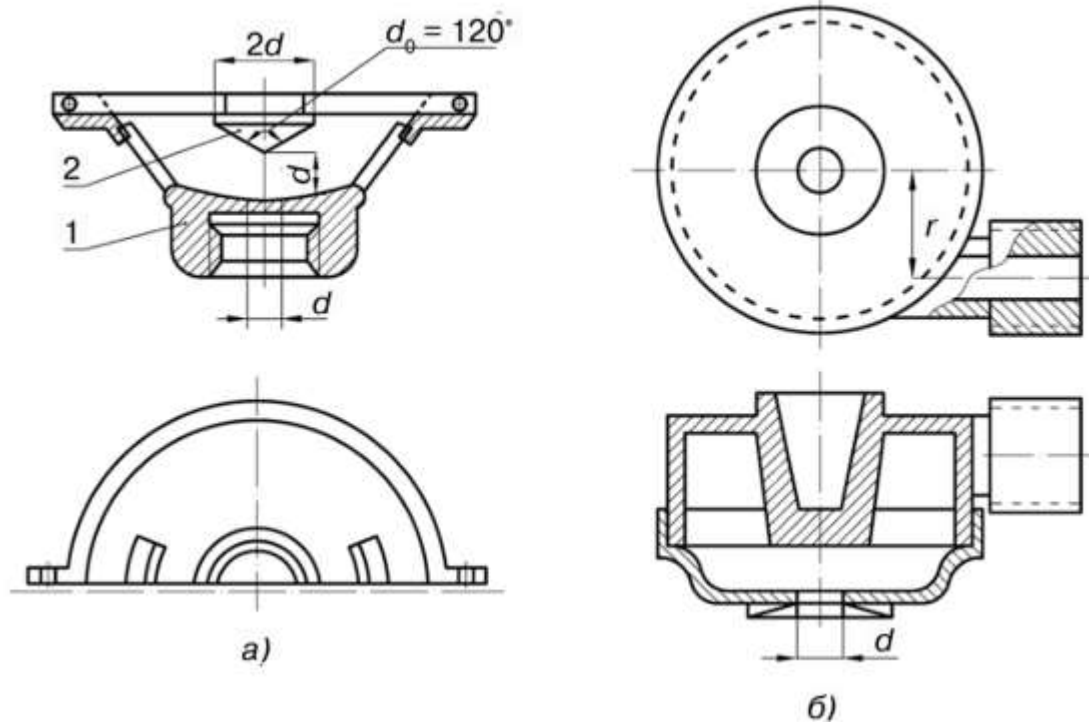


Рисунок 1.1. Веерные дождеватели: *а* - дефлекторный; *б* - центробежный

Наиболее широкое распространение среди них получили дефлекторные дождеватели (рис. 1.1, *а*). В нижней части воронкообразного корпуса 1 дождевателя имеется резьба для навинчивания его на патрубок или открылок дождевальной машины. В средней части корпуса 1 находится диафрагма с отверстием. В верхней части воронки укреплена планка, к которой крепится дефлектор 2, выполненный в виде конуса и расположенный вершиной в сторону диафрагмы. Ось дефлектора 2 совпадает с осью отверстия в диафрагме.

Струя воды, вытекающая из отверстия диафрагмы, обтекает конус дефлектора 2 и образует пленку воронкообразной (веерной) формы. При дальнейшем движении пленка распадается на капли и орошает прилегающую к

насадку круговую площадь. Обычно угол конусности дефлектора 2 принимается 120° , и пленка стекает с дефлектора под углом 30° к горизонту.

Дефлекторные дождеватели используются в двухконсольных дождевальными машинах и дождевальными установках с разборным трубопроводом.

При выращивании культур в защищенном грунте широкое применение находят центробежные дождеватели (рис. 1.1, б). В них жидкость перед выходным отверстием сопла приобретает интенсивное вращение в камере закручивания, куда она поступает через тангенциальные каналы. В результате наличия тангенциальной составляющей скорости при истечении из сопла жидкость отбрасывается на периферию выходного отверстия. При выходе из сопла жидкость образует тонкую пленку, подобную пленке, стекающей с конического дефлектора. При дальнейшем движении эта пленка теряет устойчивость и распадается, образуя искусственный дождь.

Струйные дождеватели, как правило, называют дождевальными аппаратами. Они классифицируются по рабочим параметрам на средне- и дальнеструйные.

К среднеструйным относятся аппараты с радиусом захвата до 30...35 м, работающие при давлении от 0,15 до 0,4 МПа. К дальнеструйным относят аппараты с радиусом захвата 50 м и более, работающие при давлении свыше 0,4 МПа.

Имеются аппараты с расходом 80 л/с, работающие при давлении 0,8... 1,0 МПа. Среднеструйные аппараты получили наиболее широкое распространение [19].

Все струйные аппараты содержат следующие конструктивные элементы:

- корпус дождевального аппарата, предназначенный для соединения аппарата с водопроводящим стояком и крепления вращающегося ствола;
- ствол аппарата с коленом, соединенный с корпусом посредством стакана, размещенного в направляющем и упорном подшипниках;
- сопло, закрепленное на конце ствола и служащее для формирования струи;

- выпрямитель, или успокоитель, расположенный в проточной полости ствола аппарата и служащий для выравнивания потока и снижения турбулентных пульсаций, что способствует увеличению дальности полета струи;

- механизм поворота ствола аппарата.

По конструкции механизма поворота и принципу его действия дождевальные аппараты (струйные дождеватели) подразделяются на следующие группы с приводом:

- качающегося коромысла;
- турбинки;
- вакуума, создаваемого потоком жидкости;
- реактивного действия струи.

Дождевательные аппараты коромыслового типа имеют множество конструктивных разновидностей.

На рис. 1.2, *а* изображен среднеструйный аппарат ПУК-2. Он состоит из стакана 11, расположенного в корпусе 9. Стакан 11 переходит в ствол 12, оканчивающийся сменными соплами - большим 6 и малым 8, и имеющий ударный прилив 4. В стволе 12 расположен успокоитель 7.

Струя воды, вылетающая из малого сопла, ударяется о лопатки коромысла 5 и поворачивает его в сторону на определенный угол. Коромысло 5, поворачиваясь на оси 2, закручивает возвратную пружину 1 с крышкой 3. Раскручиваясь, пружина 1 возвращает коромысло 5 в первоначальное положение.

В конце обратного хода коромысло 5 ударяет о прилив ствола, поворачивая последний на некоторый угол. Далее цикл повторяется, и ствол 12 вращается вокруг вертикальной оси. Манжета 10 уплотняет соединение аппарата с гидрантом.

Принцип работы и основные конструктивные элементы аппарата с коромыслом, качающимся относительно горизонтальной оси, видны из рис. 1.2, *б*, на котором представлен аппарат «ГрузНИИГиМ». Основные части этого

аппарата: корпус 5, ствол 4, снабженный успокоителем потока 3, коромысло 7, закрепленное на горизонтальной оси 6.

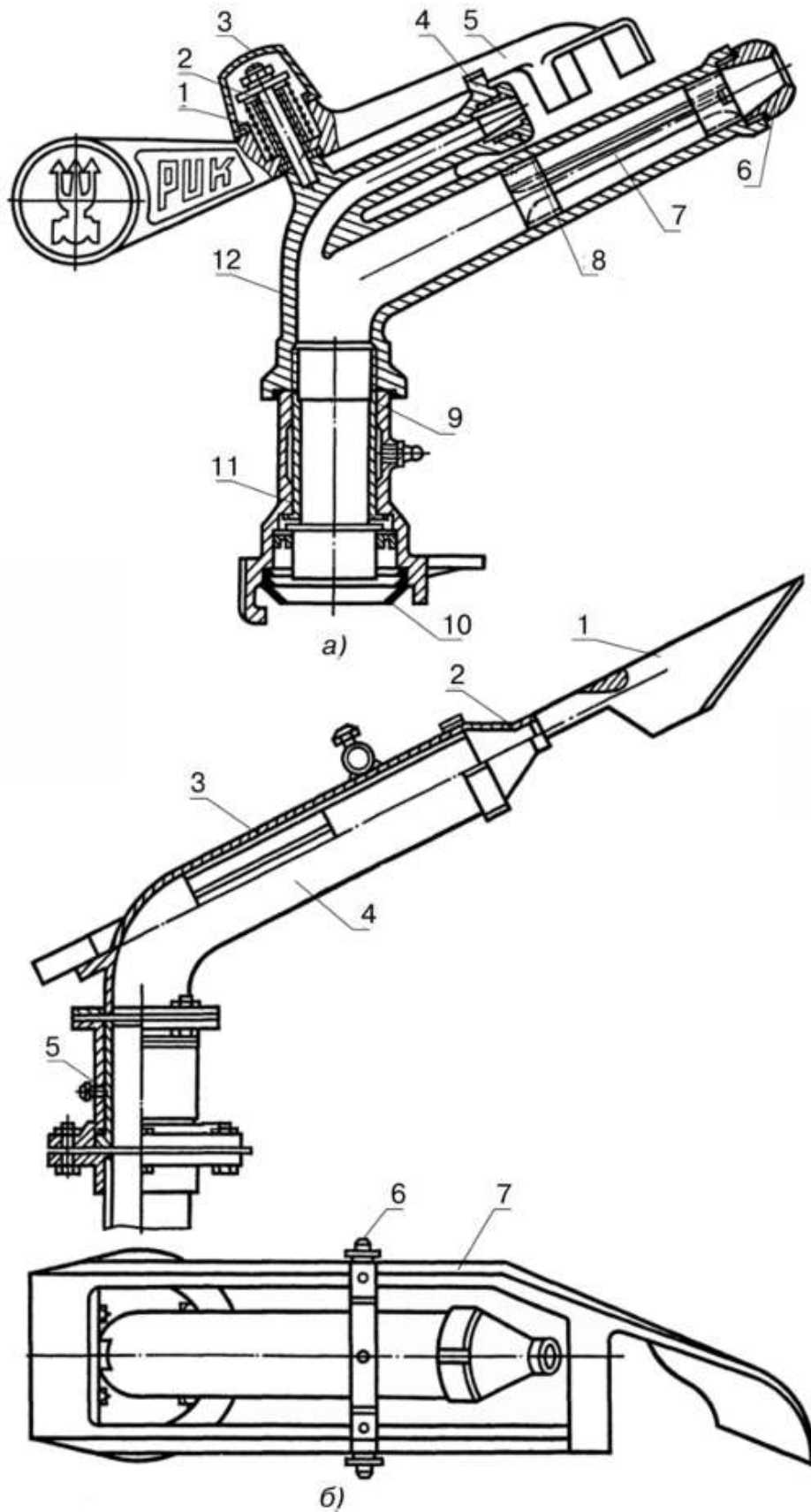


Рисунок 1.2. Среднеструйные дождевальные аппараты коромыслового типа - с коромыслом, качающимся в горизонтальной (а) и вертикальной (б) плоскости

На конце коромысла 7 имеются неподвижная лопатка 1 и прилив в виде клина. Коромысло 7 уравнивается противовесом. Струя, вытекающая из сопла 2, ударяет о лопатку 1 и отбрасывается благодаря соответствующей внутренней поверхности лопатки вверх и в сторону вправо. Вследствие реактивного воздействия струи коромысло 7 выбрасывается из струи вниз и стремится повернуться в сторону влево. Этот момент вращения воздействует на ось 6 и поворачивает ствол 4 аппарата на некоторый угол.

В дождевальных аппаратах с приводом от турбинки поворот ствола осуществляется за счет энергии струи, отбираемой активной турбинкой.

На рис. 1.3 представлен аппарат ДД-30 [19]. Принцип работы его следующий. В струю вводится лопастная активная турбинка 4, посаженная консольно на трансмиссионный валик. Струя приводит во вращение турбинку 4 с достаточно большой частотой вращения - $1000... 1500 \text{ мин}^{-1}$. Ее вращение через две червячные передачи 2 и 5 и шатун передается на храповой механизм поворота ствола 7 с реверсивным устройством 3, обеспечивающим работу аппарата по сектору, ограниченному упорами 1. Кулисно-храповой механизм закреплен на подвижном стволе 7 так, что храповик отталкивается от зубьев храпового колеса, неподвижно закрепленного на корпусе аппарата. Положение турбинки 4 может меняться относительно струи посредством регулировочного упора 6.

Дождевальный аппарат с механизмом привода, работающим за счет разрежения, снабжен соплом, в средней части проточной полости которого имеется сжатое сечение, т.е. сопло заканчивается коническим расходящимся насадком. В сжатом сечении устанавливается давление ниже атмосферного.

Создаваемое насадком разрежение по специальному каналу передается к вакуумному двигателю, например диафрагменному. Колебательные движения

диафрагмы через храповой механизм или другую передачу обеспечивают привод ствола аппарата.

Привод ствола дождевального аппарата от реактивного действия струи осуществляется благодаря наклону оси сопла к оси ствола аппарата. Реактивное усилие, вызванное изменением направления потока, обеспечивает поворот ствола.

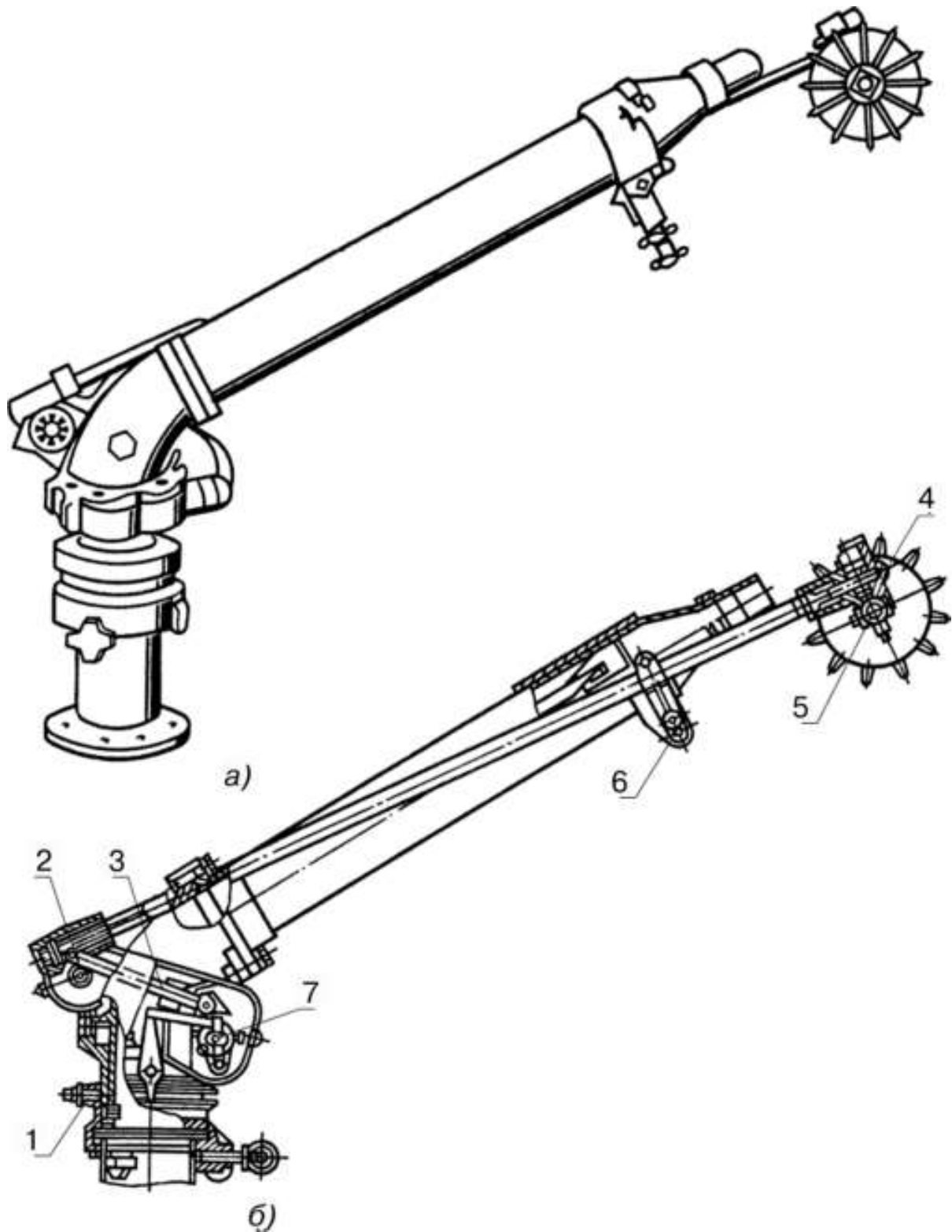


Рисунок 1.3. Дальнеструйный дождевальный аппарат с приводом от турбины ДД-30: *a* -общий вид; *b*- схема

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 спускных трубок, муфты и штуцеры, утяжелители и регуляторы давления.

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

К ним относятся: среднеструйные дождевальные аппараты «Фрегат» №№1, 2, 3, 4 и 5; насадки секторного полива (разработки СибНИИГиМ, УкрНИИГиМ, ЮжНИИГиМ и ВНИИ «Радуга»); насадка грибкового типа (СтавНИИГиМ); насадка центробежная (разработка ВНИИ «Прогресс»); дождеватель типа «сегнерово колесо» (разработка ВНИИ «Радуга»); насадка щелевого типа (разработка ВИСХОМ); насадки дефлекторные (разработка ВНИИГиМ и ВолжНИИГиМ) [5, 35, 42, 45, 47, 63- 65, 76, 79].

Проанализируем преимущества и недостатки применяемых дождевателей различных типов.

Серийные дождевальные машины «Фрегат» изначально комплектовались среднеструйными дождевальными аппаратами (СДА) [60].

Достоинством среднеструйных дождевальных аппаратов «Фрегат» является большой радиус полива, изменяющийся вдоль трубопровода (от 10 до 25 м), и низкая средняя интенсивность дождя (от 0,05-0,40 мм/мин) [61-63], высокая равномерность полива.

Недостаток серийных дождевальных аппаратов – высокая стоимость и формирование дождя большой крупности капель. 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 [61- 63], что оказывает большое энергетическое воздействие на сельскохозяйственные растения и почву, разрушая и уплотняя ее. Мгновенная интенсивность дождя также изменяется вдоль трубопровода машины «Фрегат» от 1,2 до 2,6 мм/мин [45, 64].

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 лопатки или отражатели, насадки специальных форм, а также переходники с дополнительными стволами для создания многоструйности. К устройствам периодического действия относятся прерыватели кругового и гребенчатого типа [68, 216- 219]. Повышения устойчивости струй к ветру можно добиться за счет снижения угла вылета струи, степени распыления и частоты вращения [10, 28, 29, 64].

По сравнению с дождевальными аппаратами, применение дождевателей в виде дефлекторных насадок требует учащенную схему их расстановки, 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 [63].

Дождеватель «грибкового типа», разработанная СтавНИИГиМ [63] создает тонкую пленку распыла, распадающуюся на мелкие капли. К недостаткам можно отнести большую вероятность засорения мусором, частые поломки края насадки; сложность регулировки расхода.

Секторные дождеватели работают на машине «Фрегат» при напоре 0,6-0,7 МПа, и чтобы обеспечить необходимый расход 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 [37]. Они также подвержены частому засорению.

Центробежные дождеватели применяются в РФ и на Украине на дождевальных машинах типа ДДА-100М и ДДА-100МА [63, 64]. 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 6м), а соответственно большая интенсивность.

Дождеватель типа «сегнерово колесо» разработано во ВНИИ «Радуга» для широкозахватных ДМ «Коломенка» [47]. Основными недостатками таких дождевателей являются большая металлоемкость, значительные затраты на монтаж и демонтаж.

Основными дождевателями, применяемыми на российских и импортных дождевальных машинах, являются (рис. 1.4) 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) [36, 75, 78, 80, 81, 83].



1-Komet KPS, 2- Komet Twister, 3- Senninger Superspray, 4- Senninger LDN, 5 - Senniger i-Wob
Рисунок 1.4 – Основные дождеватели Российских и импортных ДМ

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. 1.5).

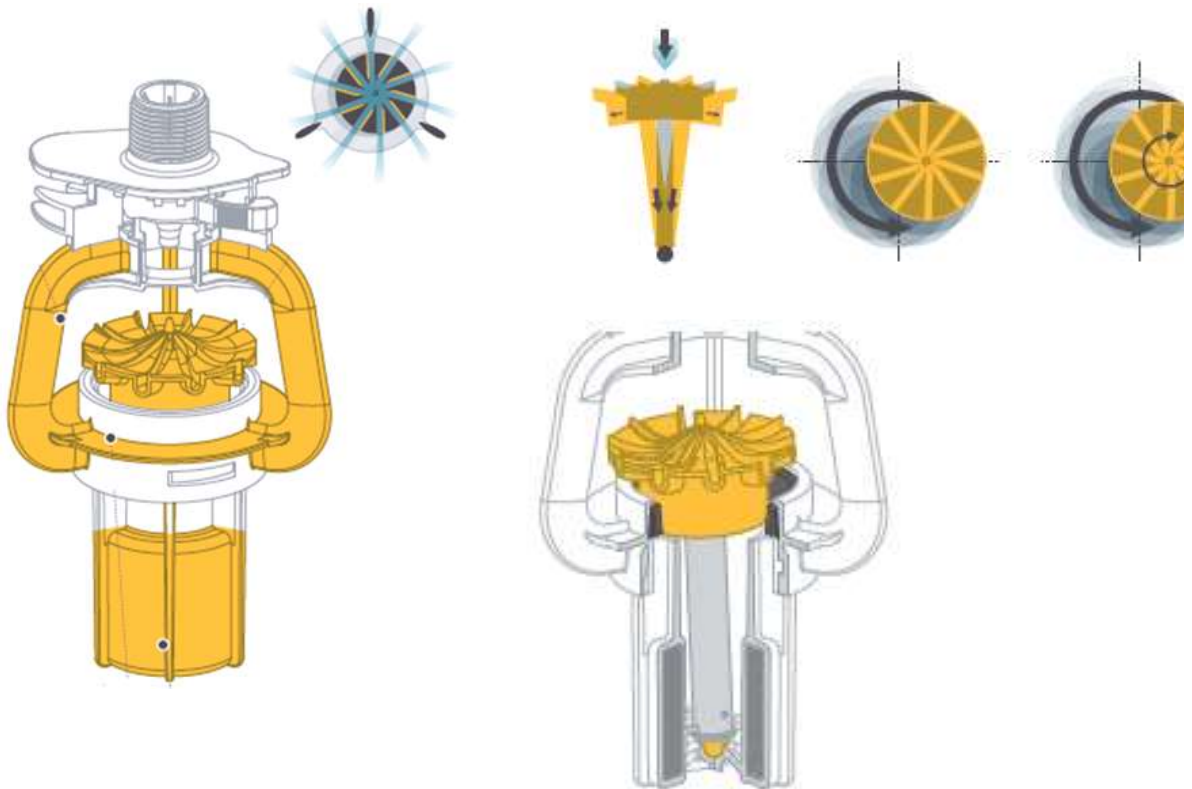


Рисунок 1.5 – «Komet 3-D Система движения»

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. 1.6).



Рисунок 1.6
Дефлекторы Komet

Их основные характеристики и области применения представлены в таблице 1.1 [86].




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.1.7).

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

Компания Senninger разработала дождеватели с несколькими, установленными друг над другом дефлекторами (рис. 1.8).

Таблица 1.1 – Характеристики насадок фирмы Nelson Irrigation

Наименование	Рисунок	Параметры давление, МПа радиус полива, м	Основные характеристики/ назначение
Rotator		0,07-0,34 МПа 15,2-22,6 м	Увеличенный радиус полива. Уменьшение интенсивности полива Равномерность за счет перекрытия струй
Accelerator		0,04-0,1 МПа 9,1-16,8 м	Спроектирован для дождевания изнутри стеблей. A3000 Accelerator увеличивает скорость вращения по мере увеличения диаметра форсунок, что максимально увеличивает площадь разбрызгивания, минимизируя потери от испарения при низкой интенсивности потока.
Spinner		0,07-0,14 МПа 12,8-16,5 м	Мягкое дождевание при низком давлении. Свободно вращающийся S3000 Spinner обеспечивает мягкие капли для чувствительных культур и почв.

Orbitor		0,04-0,14 МПа 11,0-18,3 м	Обтекаемая конструкция. Исключает распорки сплинклерного корпуса, обеспечивает однородность и оптимальный размер капель при низком давлении. Снижение засоряемости.
Sprayhead		0,04-0,28 МПа 4,9-12,2м	Насадка для проращивания семян, орошения. Съемная двусторонняя крышка позволяет менять структуру разбрызгивания
		Рисунок 1.7 – Дождеватель i-Wob с линейкой дефлекторов	
 <p>Стандартный угол с 6 желобками Мелкие капли</p>	 <p>Стандартный угол с 9 желобками Средние капли</p>	 <p>Низкий угол с 9 желобками Средние капли</p>	 <p>Низкий угол с 6 желобками Крупные капли</p>
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			

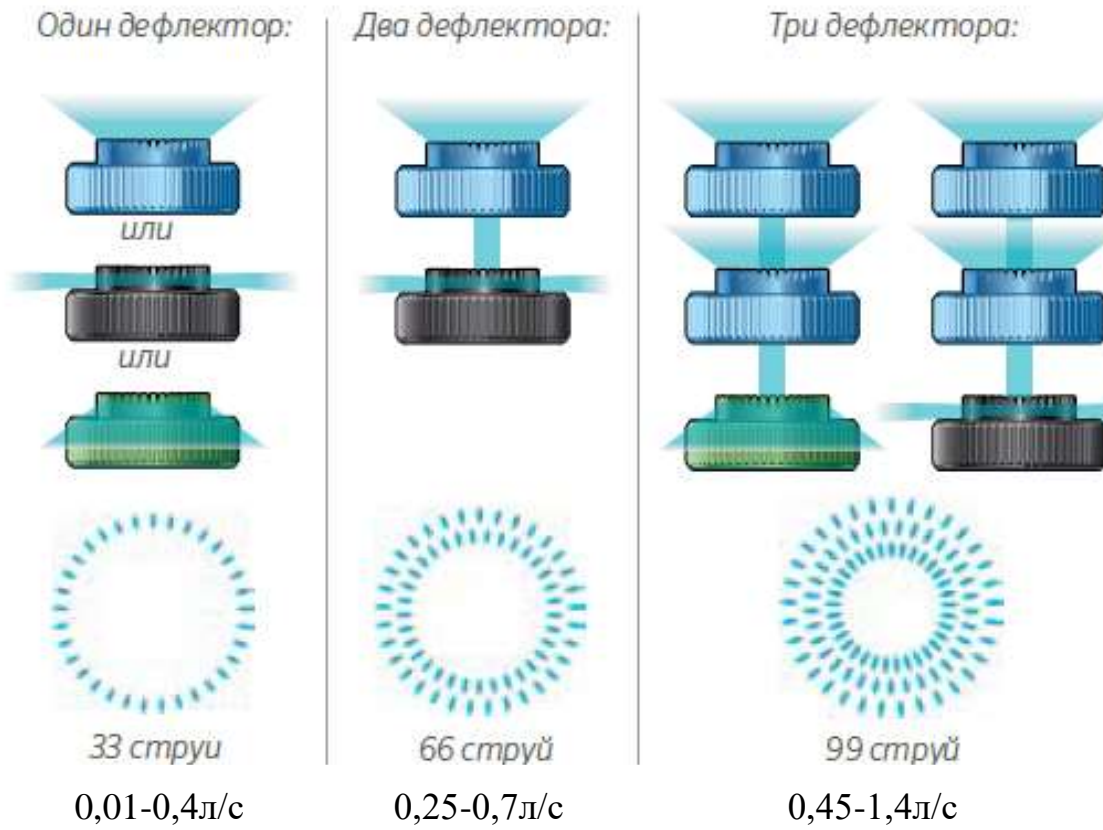


Рисунок 1.8– Многоярусные дефлекторы [78]

Также в зависимости от культуры дождеватели обеспечиваются съемной вставкой для направления подачи воды под определенным углом (рис. 1.9).

Кукуруза. Вставка для обработки: 58°

Хлопок. Вставка для обработки: 15-30°

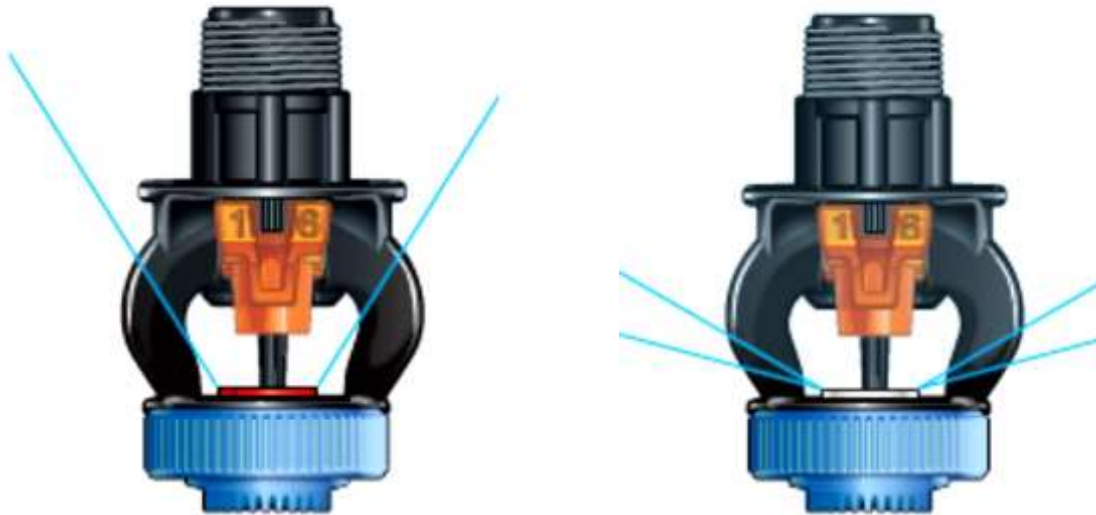


Рисунок 1.9 – Вставка для направления подачи воды

Дождеватель Super Spray от Senninger (рис.1.10), оснащен взаимозаменяемыми дефлекторами (22 вида дефлекторов), удовлетворяющими различным требованиям по размеру капель, культурам, климатическим условиям и типам почвы [36].

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

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. 1.11) [84].



Рисунок 1.10 – Super Spray от Senninger



Плоский с желобками



Вогнутый с желобками



Выпуклый с желобками



Плоский гладкий



Вогнутый гладкий



Выпуклый гладкий

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 [31].

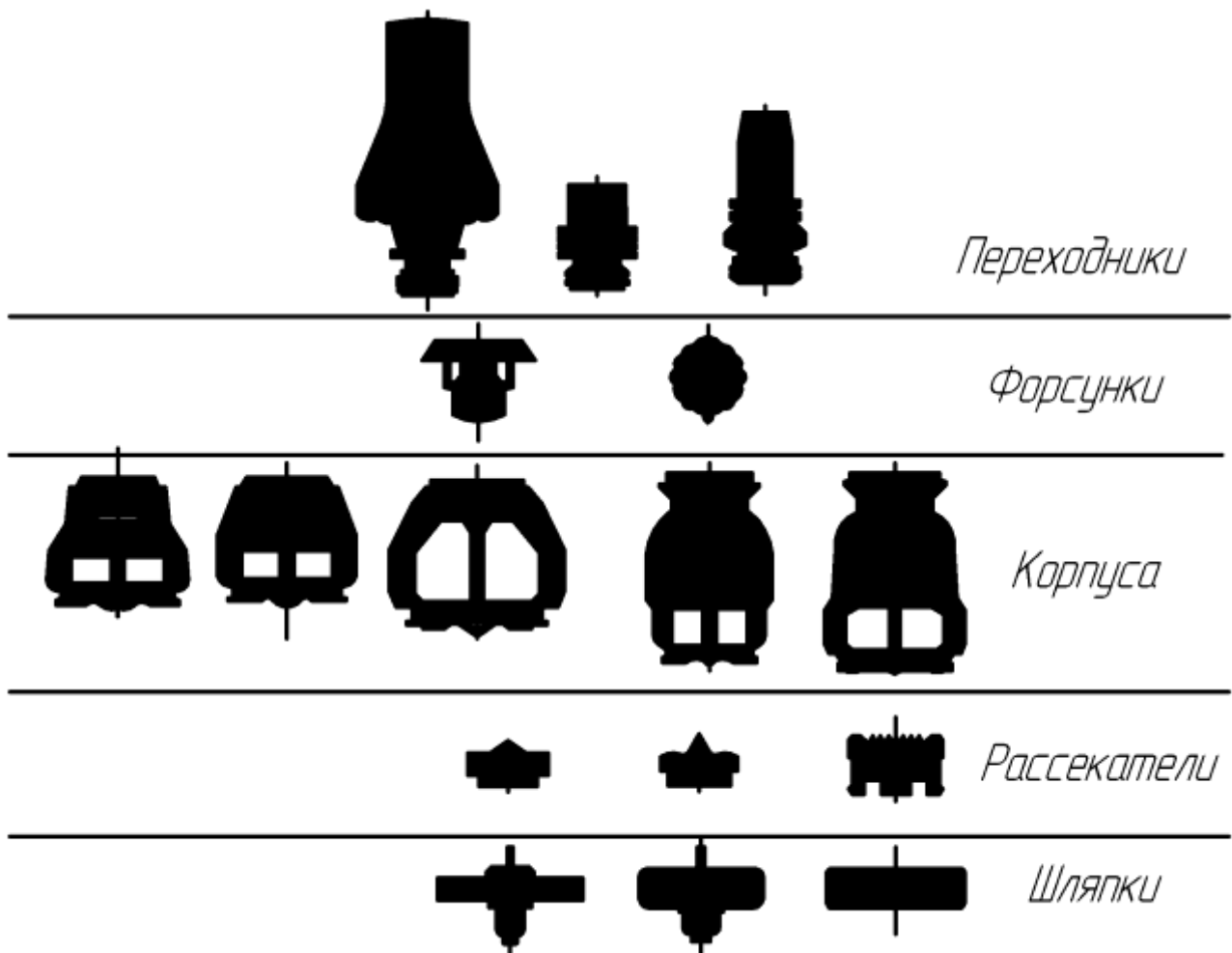


Рисунок 1.11 – Элементы дождевателей

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. 1.12) [49]. Вытекающая из него под действием перепада давления струя распадается на капли, образуя грубый полидисперсный факел с малым корневым углом. Распад жидкостных струй в значительной степени определяется формой струи, в свою очередь зависящей от формы соплового канала.

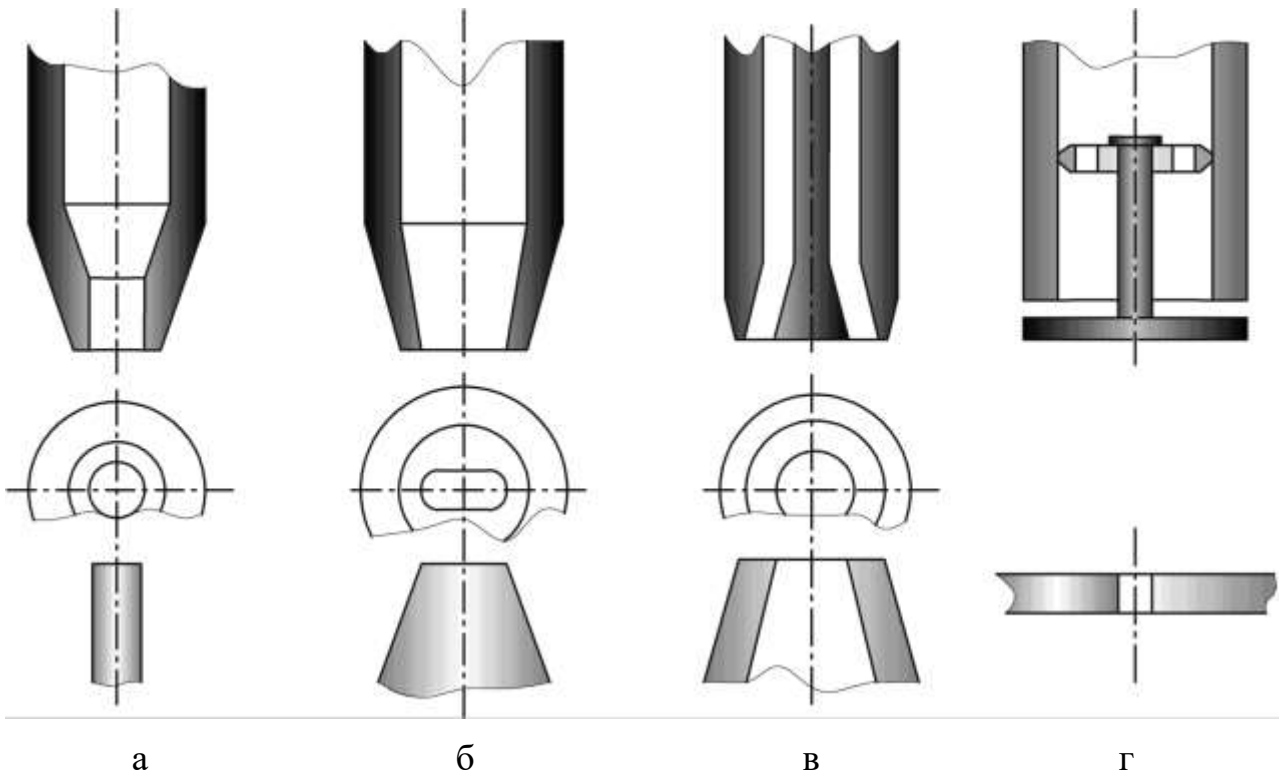


Рисунок 1.12 – Формы сопловых канавок и образующихся струй в струйных форсунках: а – цилиндрическое сопло (цилиндрическая струя), б – щелевидное сопло (плоская веерная струя), в – кольцевое сопло (плоская коническая струя), г – сопло в виде круговой прорези (радиально расширяющаяся струя)

Работа дождевателей с соударением струй основана на взаимном разбивании на капли нескольких струй, вытекающих из соответствующих насадков (рис. 1.13). Из точки столкновения результирующий поток растекается радиально, образуя плоскую пленку, распадаются на капли. При соударении пары цилиндрических струй образуется плоский веерный 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.

В ударно-струйных дождевателях (дефлекторных) распыливание происходит за счет удара струи о расположенный напротив сопла отражательный элемент (рис. 1.14). В зависимости от конструкции отражателя

образуется факел в виде одиночного полого конуса или в виде нескольких вставленных друг в друга конусов.

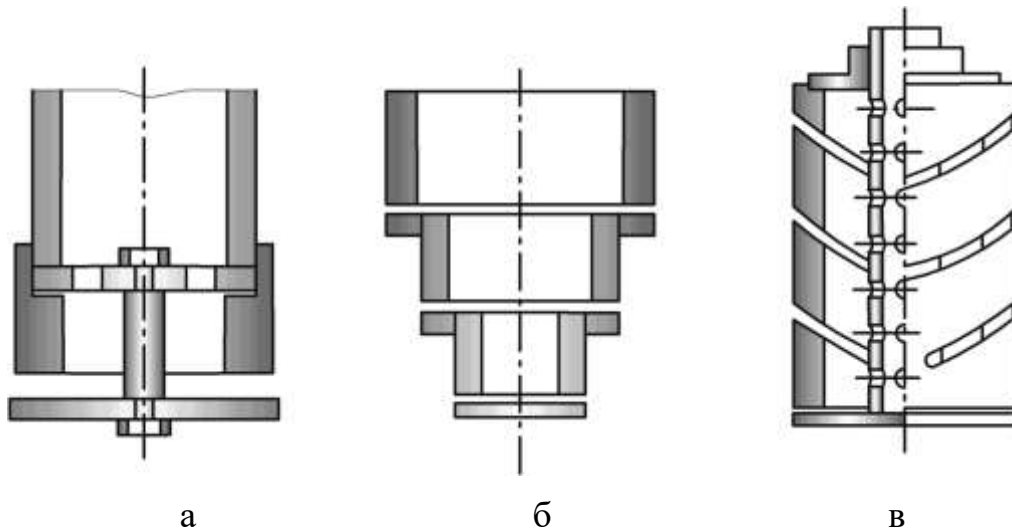


Рисунок 1.13 – Схемы струйных форсунок с соплом в виде круговой прорези: а – одноплечная, б – многоплечная; в – спиральная

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).

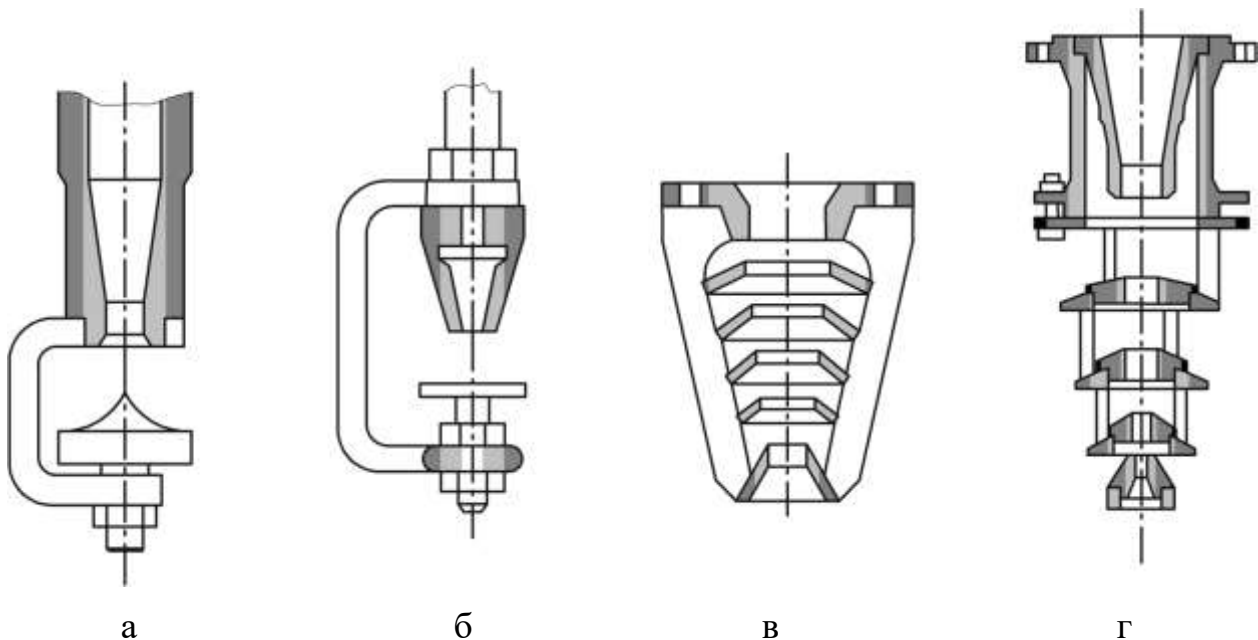


Рисунок 1.14 – Схемы ударно-струйных форсунок со сплошным отражателем (а, б) и каскадных (в, г)

Центробежные насадки (рис. 1.15) имеют либо тангенциальные входные отверстия, либо шнек, что задает подаваемой жидкости вращательное движение. В сопловом канале жидкость движется вдоль его стенки в виде тонкой пленки, а центр заполняет воздушный вихрь. При истечении из сопла пленка образует факел в виде полого конуса.

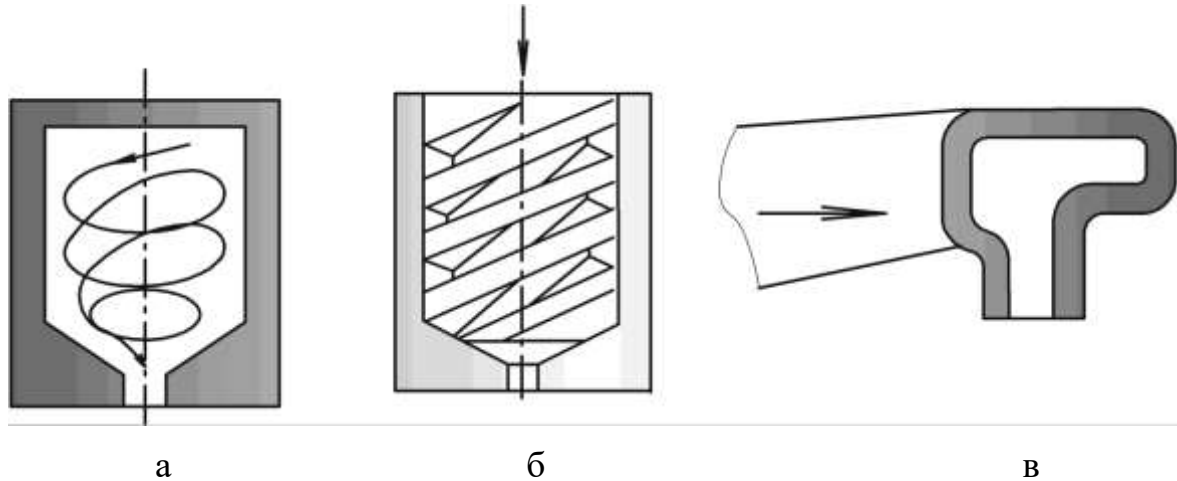


Рисунок 1.15 – Схемы центробежных форсунок: а – тангенциальная; б – шнековая; в – эвольвентная

1.2 Конструктивные схемы рассекателей потока жидкости

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

Форма рассекателя 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.

Наибольшим многообразием конструктивных вариантов отличаются дисковые рассекатели (рис.1.16). 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.

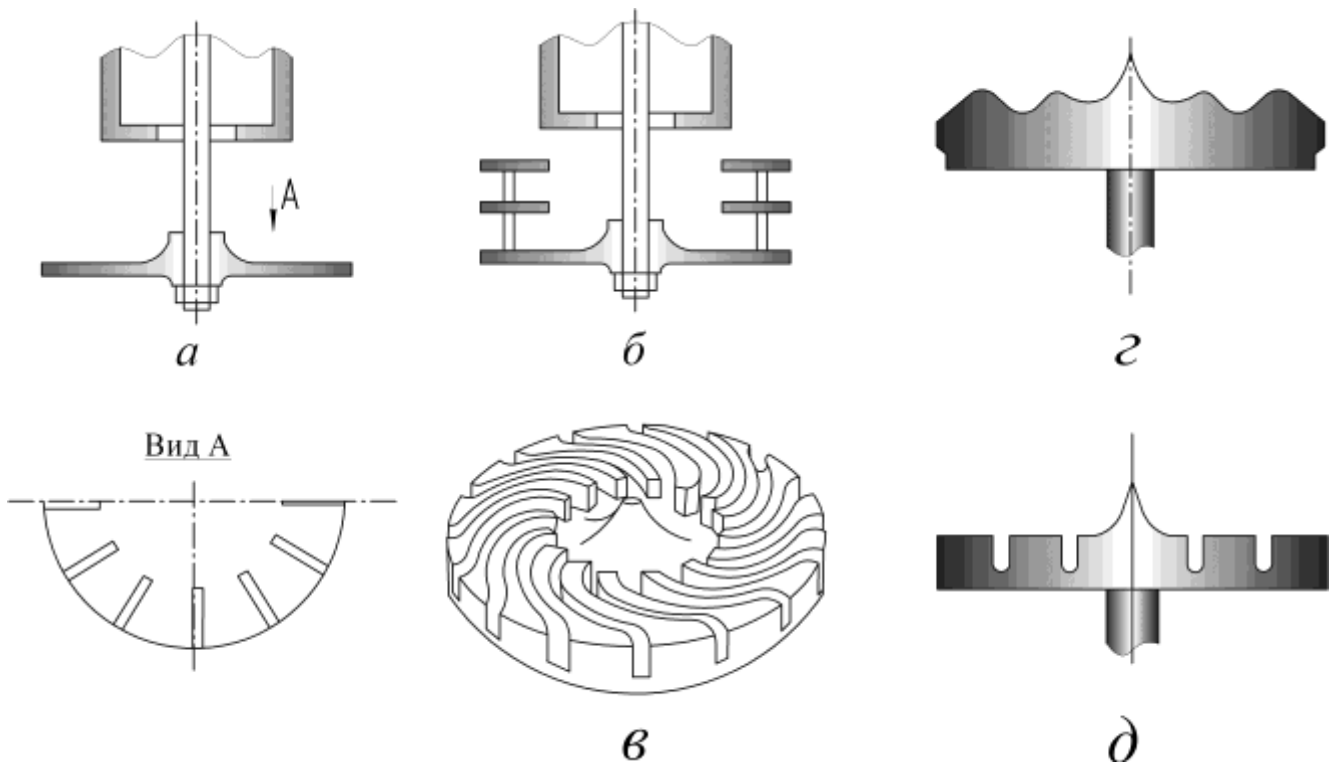


Рисунок 1.16 – Схемы распыливающих элементов: *a* – гладкий одиночный диск; *б* – лопастной, многоярусный; *в* – с криволинейными канавками-проточками прямоугольного профиля; *г* – канавками обтекаемой формы; *д* – с канавками-проточками параболической формы

Во вращающихся дефлекторах каналы изогнуты таким образом, что жидкость покидает их почти по касательной к внешнему диаметру. Создается некоторый момент силы реакции вытекающей струи, и дефлектор начинает вращаться вокруг оси. Плотность орошения можно регулировать шириной и числом канавок, а размер орошаемой поверхности – высотой канала 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 [5, 7, 8, 13, 26, 92, 35, 36, 41, 43, 44, 45, 63, 65, 66, 67].

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 эррозионно-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.

1.3 Устройства приповерхностного полива

Устройства приповерхностного полива отличаются также конструктивным разнообразием и материалами (рис.1.17) [46]. 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 [36,82, 86].

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 1.2 (рис. 1.18).

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



Одиная 180°

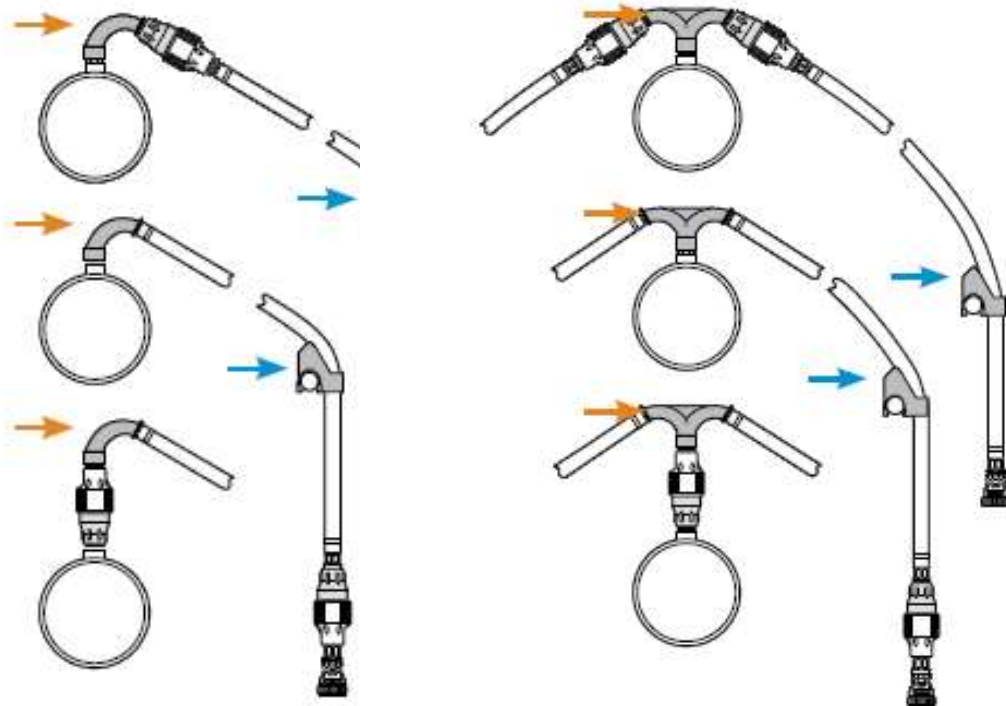
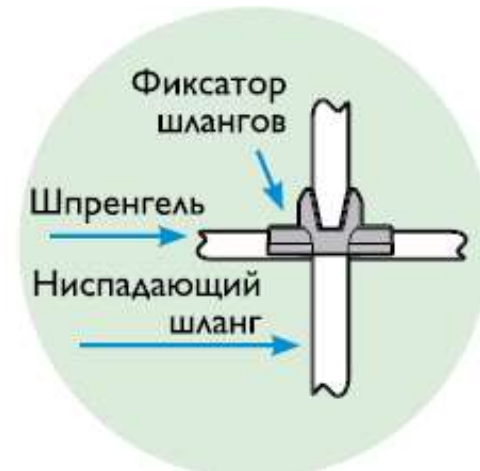
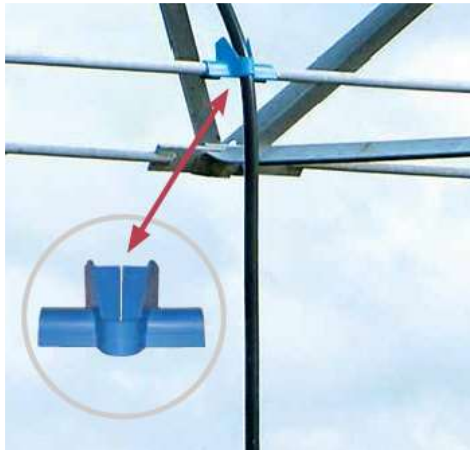
Двойные
трубы-гусак с
углом 125°

Рисунок 1.17 – Устройства приповерхностного полива

Таблица 1.2 – 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	PMR06MF	0,041	0,551	0,25-1,01
PRL10	0,069	0,620	0,03-0,50	PMR10MF	0,069	0,620	0,13-1,26
PRL12	0,083	0,620		PMR12MF	0,083	0,620	
PRL15	0,103	0,655		PMR15MF	0,103	0,655	
PRL20	0,138	0,689		PMR20MF	0,138	0,689	
PRL25	0,172	0,724		PMR25MF	0,172	0,724	
PRL30	0,207	0,758		PMR30MF	0,207	0,758	
PRL35	0,241	0,793		PMR35MF	0,241	0,793	
PRL40	0,276	0,827		PMR40MF	0,276	0,827	



Senninger



Senninger



Nelson



Nelson

Рисунок 1.18 – Регуляторы давления

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

1.4 Качество полива

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.

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 [13, 14,38, 47].

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 [47]:

$$\sum_{i=1}^{N_M} p_{vi} \cdot \Delta d_K = 0,5 \quad (1.1)$$

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_{Π} применяется зависимость [47]:

$$d = a_n r_{\Pi}^2 + b_n r_{\Pi} + c, \quad (1.2)$$

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 [47]:

$$d_M = k_M d_K + c_0 \quad (1.3)$$

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) [14, 47]:

$$N = \frac{V_d}{v_K} \quad (1.4)$$

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

$$v_K = \frac{\pi}{6n_i} \sum d_i^3 \quad (1.5)$$

где n_i , d_i – количество капель, диаметр капель i -го класса, измеренных каплемером или с помощью фильтровальной бумаги другими устройствами контроля [12].

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 [26,32, 58, 71].

При этом установлено, что например, в начале ДМ «Фрегат» средний диаметр капель дождя составляет 0,2-0,4 мм, а в конце – увеличивается до 1,6-2,2 мм [44, 45, 63, 64].

На равномерность влияют следующие показатели: скорость и направление ветра, степень дисперсности струй и их перекрытия, колебания давления в закрытой сети, рельеф поля, формы эпюр дождя вдоль радиуса полива и др. [6, 8, 47, 63, 65].

Интенсивность также изменяется в значительных пределах. Так в начале ДМ «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 [63 -65].

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 :

$$N_D = \frac{W}{t}, \quad \text{Вт} \quad (1.6)$$

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

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

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

n_i – доля капель i -го размера;

V'_{ki} – 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 % [63]. 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 [63].

Исследования всех авторов показывают, что объем стока повышается по мере приближения к последней тележке машины, а также с увеличением кратности поливов [17]. В Саратовской области аналогичные результаты получены учеными ВолжНИИГиМа (полив машиной «Фрегат» темно-каштановых и каштановых почв [63-65]).

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.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ДОЖДЕВАТЕЛЕЙ

2.1 Краткий обзор исследований конструктивных и технологических параметров дождевателей. Направления совершенствования

Подбору основных параметров дождеобразующих устройств посвящены работы многих ученых [4, 5, 10, 11, 18, 19, 27, 39, 47, 63, 47, 85] 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 [39], Н.Ф. Рыжко, [61, 63-66], М.А. Бубенчикова [5], Б.А. Васильева [8], В.Е. Хабарова [75] и др.

По данным Б.М. Лебедева [39] 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 [4], Н.Ф. Рыжко[63-66], В.В. Вуколов [10] 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 [39]:

$$R' = \frac{H_D}{0,43 + 1,4 \frac{H_D}{d_0}}, \quad (2.1)$$

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 [39], А.Г. Васильевым [8], Н.Ф. Рыжко [63], Б.П. Фокиным [75] и др.

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

По данным [19] 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 дождевателей различных типов.

Тем не менее, нет обобщенного принципа расчета, критериев оптимизации конструкции дождевателей 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 дождевателей, можно разделить на две категории:

- природные факторы (климат, ветровой режим, тип и физико-механические свойства почвы, выращиваемые культуры);
- хозяйственные (производственные) факторы (вид дождевальной машины, определяющий напор, расположение дождевателя на водопроводящем трубопроводе, высота установки дождевателя над поверхностью почвы).

Итак, основными критериями оптимизации являются параметры самого дождевателя:

- диаметр сопла,
- форма и конструкция дефлектора,
- расположение дождевателя по длине водопроводящего трубопровода,
- высота дождевателя 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.

2. 2 Влияния конструктивно-технологических параметров дождевателей на процесс формирования дождя

Рассматривая подачу воды через дождеобразующее устройство (дождеватель, подводящий трубопровод, регулятор давления), определяющее в конечном счете радиус и качество полива, можно выделить три процесса взаимодействия (рис 2.1) [33]:

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.

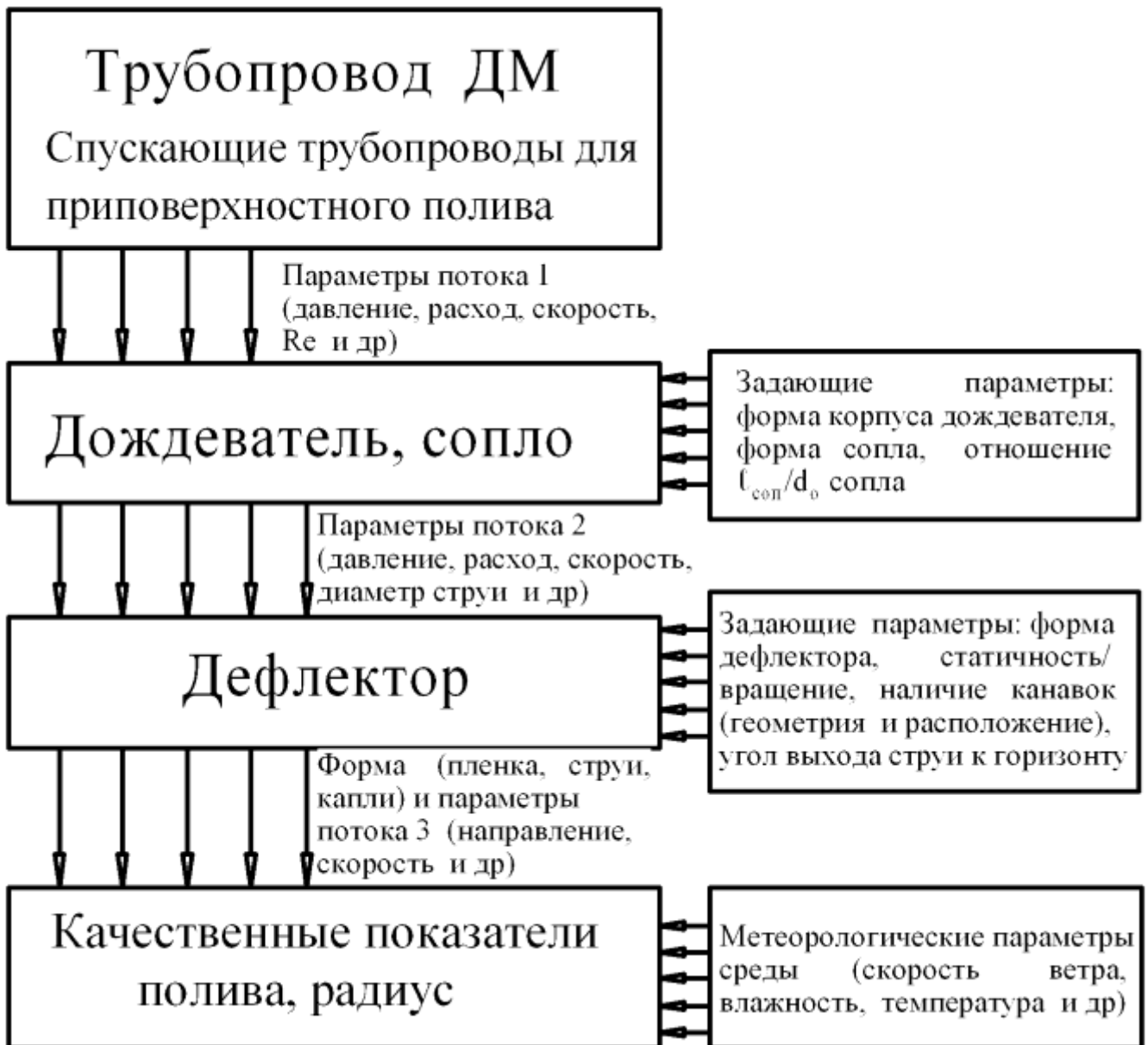


Рисунок 2.1 – Схема формирования характеристик дождя

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 капель) 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.

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. 2.2) [48].

При небольшой длине сопла ($\ell_{\text{соп}}/d_0 < 1,5-2$) 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 [79], таблица 2.1.

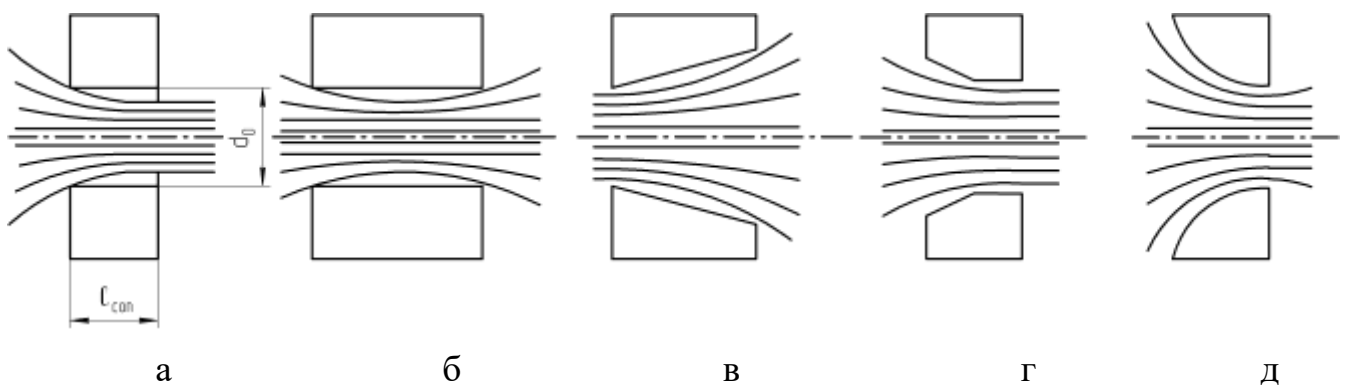


Рисунок 2.2 – Типы сопловых каналов: а – короткий цилиндрический; б – длинный цилиндрический; в – конический расходящийся; г – конический сходящийся; д – коноидальной входной кромкой

Таблица 2. 1 – Значения коэффициентов расхода μ , скорости φ и сжатия сечения ε для сопел различной формы [79]:

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 сопловый канал. В области сжатия создается разрежение, увеличивая скорость в узком сечении; возрастает коэффициент расхода. Оптимальным является соотношение $l_{\text{соп}} = (3 - 4)d_0$ [79]. 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 [48]. 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° .

Коническая 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°) у форсунок с длинным цилиндрическим каналом, а также каналом, имеющим конически сходящийся (5°) или конический вход [48-49].

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 [48]:

$$V_0 = \varphi \sqrt{\frac{2(P_d - P_0)}{\rho_B}}, \quad (2.2)$$

где P_0 – давление атмосферы, МПа;

P_d – давление на выходе из сопла дождевателя, Па;

φ – коэффициент скорости истечения;

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

Расход, м³/с, можно также выразить по расходу через отверстие согласно выражению [34]:

$$Q_H = \mu \omega_0 \sqrt{2gH_{ВХ}}, \quad (2.3)$$

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

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

Традиционно, толщина пленки, а также силовое взаимодействие между жидкостью и дефлектором определяется без учета сил трения [3, 33, 39, 78]. Вследствие чего оказываются, что толщина пленки на коническом дефлекторе и положение точки потери устойчивости пленки не зависят от скорости подачи струи на дефлектор [33, 39], что противоречит экспериментальным данным.

Рассматривая установившееся обтекание осредненным турбулентным потоком жидкости дефлектора конической формы с углом при вершине 2β (рис. 2.3) и считая движение плавно изменяющимся, а давление избыточным,

составим уравнение Бернулли для сечений 0-0, 1-1 относительно плоскости сравнения 0-0 [25]:

$$\alpha_0 \frac{V_0^2}{2g} - \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} = z_0 + h_f, \quad (2.4)$$

где h_f – суммарные потери напора, определяемые работой сил трения на поверхности 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.

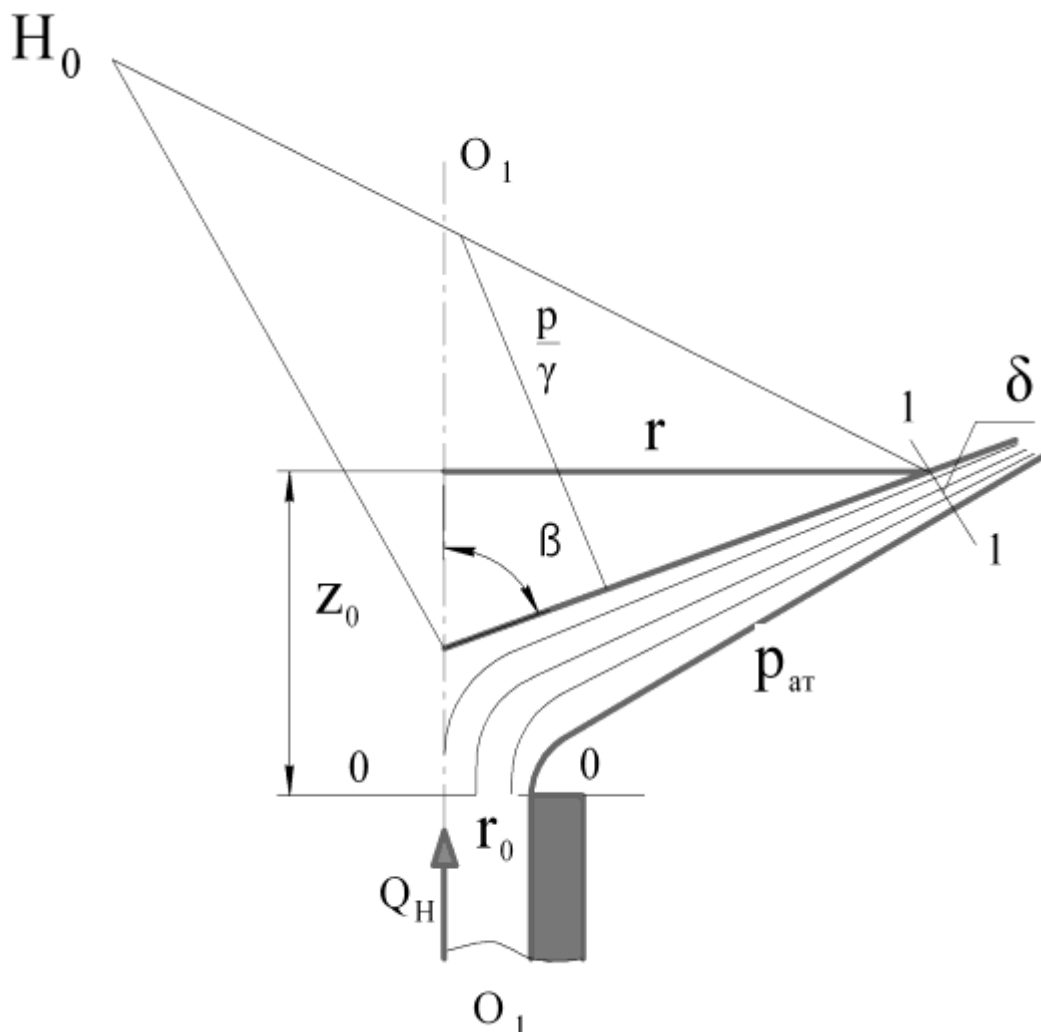


Рисунок 2.3 – Схема для определения толщины пленки жидкости

Суммарные потери напора по формуле Вейсбаха [79] будут иметь вид:

$$h_f = \zeta \frac{V_1^2}{2g}, \quad (2.5)$$

Полагая для турбулентного потока жидкости $\alpha_0 = \alpha_1 = 1$, и исключив из уравнения (2.4) средние скорости через расход Q_H и площади живых сечений, запишем:

$$Q_H = m_0 \omega_0 \sqrt{2gz_0}, \quad (2.6)$$

$$\text{где } m_0 = \left[1 - (1 + \zeta) \left(\frac{\omega_0}{\omega_1} \right)^2 \right]^{-0,5}, \quad (2.7)$$

m_0 – коэффициент расхода системы, отнесенный к сечению 1-1;

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

С другой стороны, из (2.6) следует:

$$m_0 = \frac{Q_0}{\omega_0 \sqrt{2gz_0}} = \frac{V_0}{\sqrt{2gz_0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{V_0}{\sqrt{gz_0}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{V_0^2}{gz_0}} = \sqrt{\frac{Fr_0}{2}}, \quad (2.8)$$

где Fr_0 – число Фруда набегающего потока.

Приравнивая выражения (2.7) и (2.8), находим уравнение для определения толщины пленки:

$$\delta^2 + \frac{2r}{\cos\beta} \delta - k_0 \frac{r_0^2}{\cos\beta} = 0, \quad (2.9)$$

где

$$k_0 = \sqrt{\frac{1 + \zeta}{1 - \frac{2}{Fr_0}}}, \quad (2.10)$$

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

График зависимости коэффициента k_0 от ζ и Fr_0 представлен на рис. 2.4.

График зависимости k_0 от кинетичности потока при различных значениях коэффициента сопротивления ζ представлен на рис.2.5.

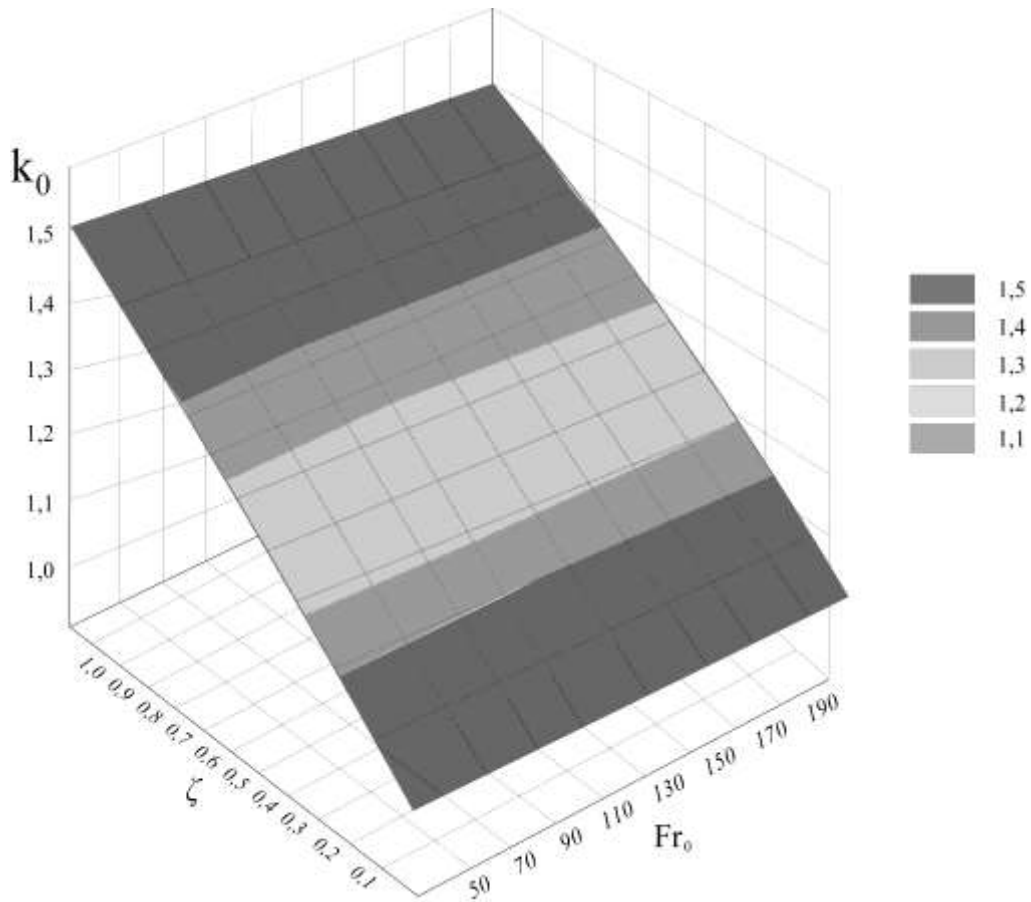


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента k_0 от ζ и Fr_0

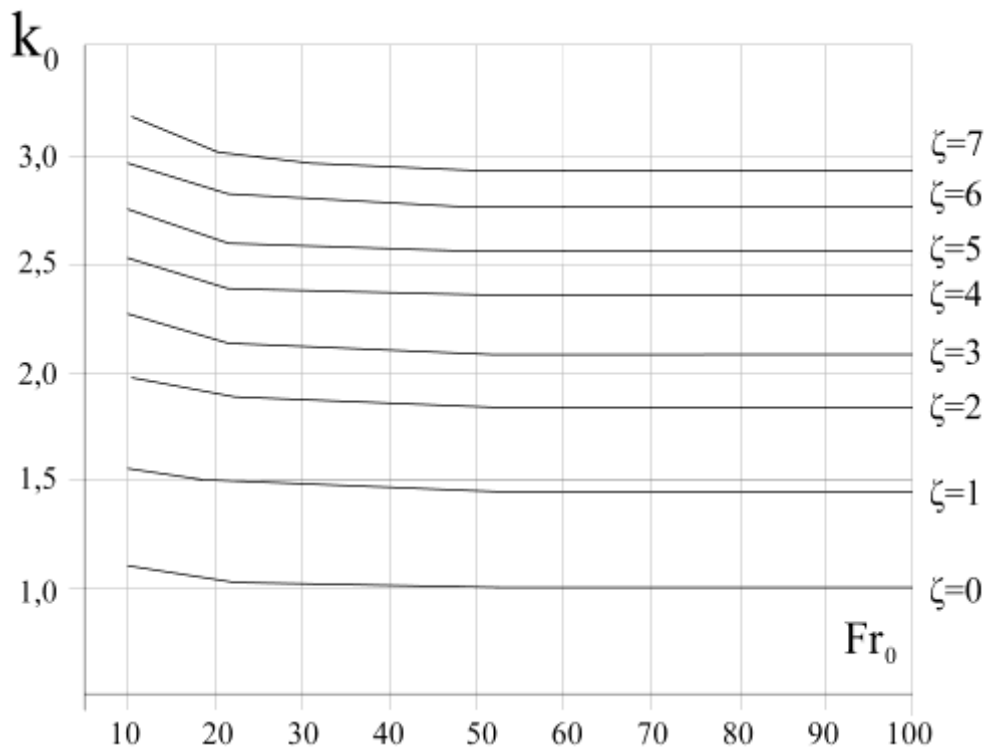


Рисунок 2.5 – Зависимость k_0 от кинетичности потока при различных значениях коэффициента сопротивления ζ

Решение уравнения (2.9) принимает вид

$$\delta = -\frac{r}{\cos\beta} + \sqrt{\frac{r^2}{\cos^2\beta} + k_0 \frac{r_0^2}{\cos\beta}}, \quad (2.11)$$

Из (2.11) заключаем, что толщина пленки увеличивается при возрастании коэффициента сопротивления ζ и уменьшается при увеличении кинетичности набегающего потока.

При $k_0=1$ из формулы (2.11) точно получается формула А.П. Исаева [33]. Другими словами, формула А.П. Исаева – это предельный случай обобщенной формулы (2.11) при $\zeta \rightarrow 0$, $Fr_0 \rightarrow \infty$.

При $\beta=90^\circ$ из (2.9) следует:

$$\delta = 0,5k_0 \frac{r_0^2}{r}. \quad (2.12)$$

Выражение также является обобщением формулы [33].

Как показывают экспериментальные исследования, числа Фруда в набегающем потоке имеют порядок десятков и даже сотен, поэтому для поправочного коэффициента k_0 можно получить приближенную зависимость, используя разложение в асимптотический ряд функции

$$\left(1 - \frac{2}{Fr_0}\right)^{-1/2} \cong 1 + \frac{1}{Fr_0} - \dots \quad (2.13)$$

$$\text{Тогда } k_0 \cong \sqrt{1 + \zeta} \left(1 + \frac{1}{Fr_0} - \dots\right), \quad (2.14)$$

Если же считать $\zeta \ll 1$, то последнюю формулу можно еще упростить:

$$k_0 \cong \left(1 + \frac{1}{2}\zeta + \dots\right) \left(1 + \frac{1}{Fr_0} - \dots\right) \approx 1 + \frac{1}{2}\zeta + \frac{1}{Fr_0}. \quad (2.15)$$

Преобразуем формулу (2.11) к безразмерному виду

$$\frac{\delta}{r} \cos\beta = \sqrt{1 + k_0 \left(\frac{r_0}{r} \sqrt{\cos\beta}\right)^2} - 1, \quad (2.16)$$

Зависимость (2.16) при различных значениях параметра k_0 представлена на графике (рис. 2.5).

Из рис. 2.4 и 2.5 следует, что коэффициент k_0 мало зависит от параметра кинетичности потока, а при числах Фруда $Fr_0 > 60$ практически не зависит (область автомодельности по числу Фруда).

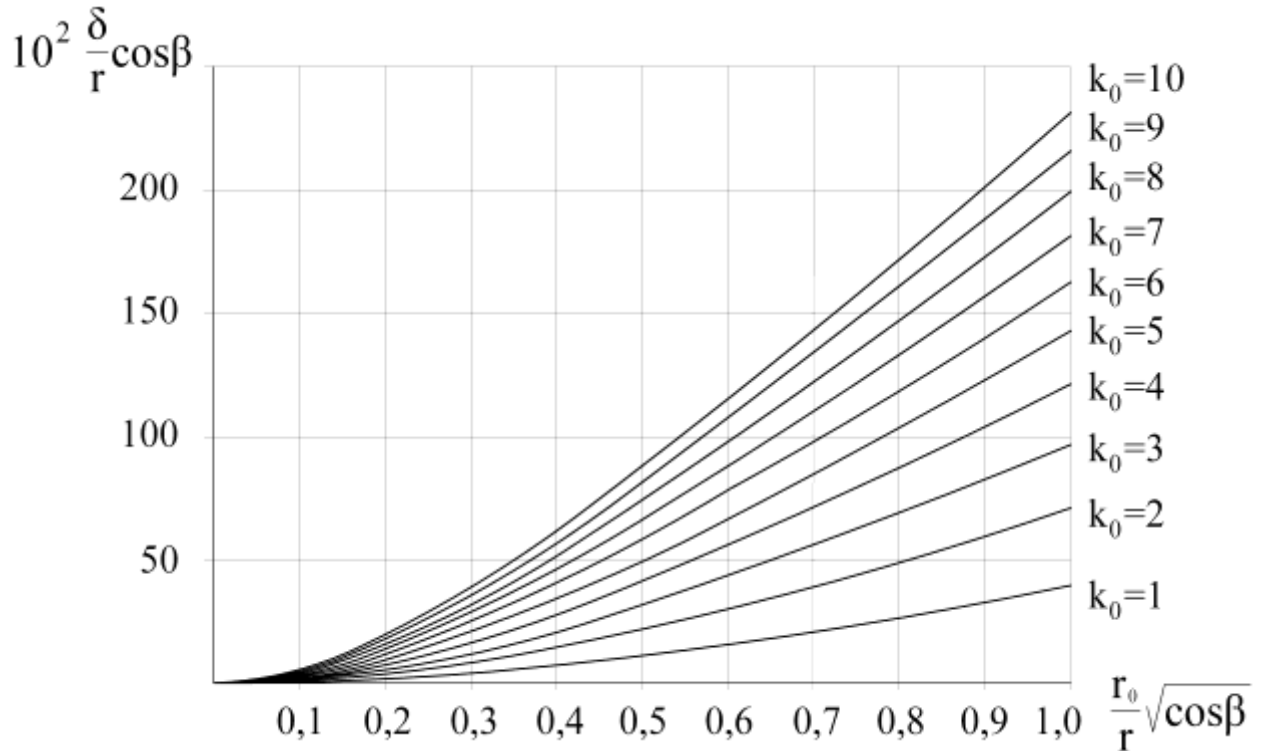


Рисунок 2.6 – Зависимость (2.16) при различных значениях параметра k_0

Согласно выражению сила динамического воздействия струи P на дефлектор находится в виде

$$P = \rho_B V_0 \omega_0 (V_0 - V_1 \cos \beta), \quad (2.17)$$

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

Выразим среднюю скорость V_1 из уравнения (2.4):

$$V_1 = \frac{V_0}{\sqrt{1 + \zeta}} \sqrt{1 - \frac{2}{Fr_0}} = \frac{V_0}{k_0}, \quad (2.18)$$

Подставив (2.18) в (2.17), получим:

$$P = \rho_B V_0^2 \omega_0 \left(1 - \frac{\cos \beta}{k_0}\right), \quad (2.19)$$

Формула (2.19) является обобщением известной формулы для силы динамического воздействия струи на коническую поверхность дефлектора.

Наибольшее значение радиуса дефлектора r_{\max} , при котором возможно безотрывное обтекание, можно получить из выражения (2.9) (рис. 2.7) [25]:

$$r_{\max} = k_0 \frac{r_0^2}{2\delta_{\max}} - \frac{\delta_{\max}}{2} \cos\beta, \quad (2.20)$$

Отсюда можно сделать вывод, что наибольшее значение радиуса r_{\max} зависит от полного гидравлического коэффициента сопротивления ζ , числа Фруда Fr_0 , радиуса сопла r_0 и угла конусности β .

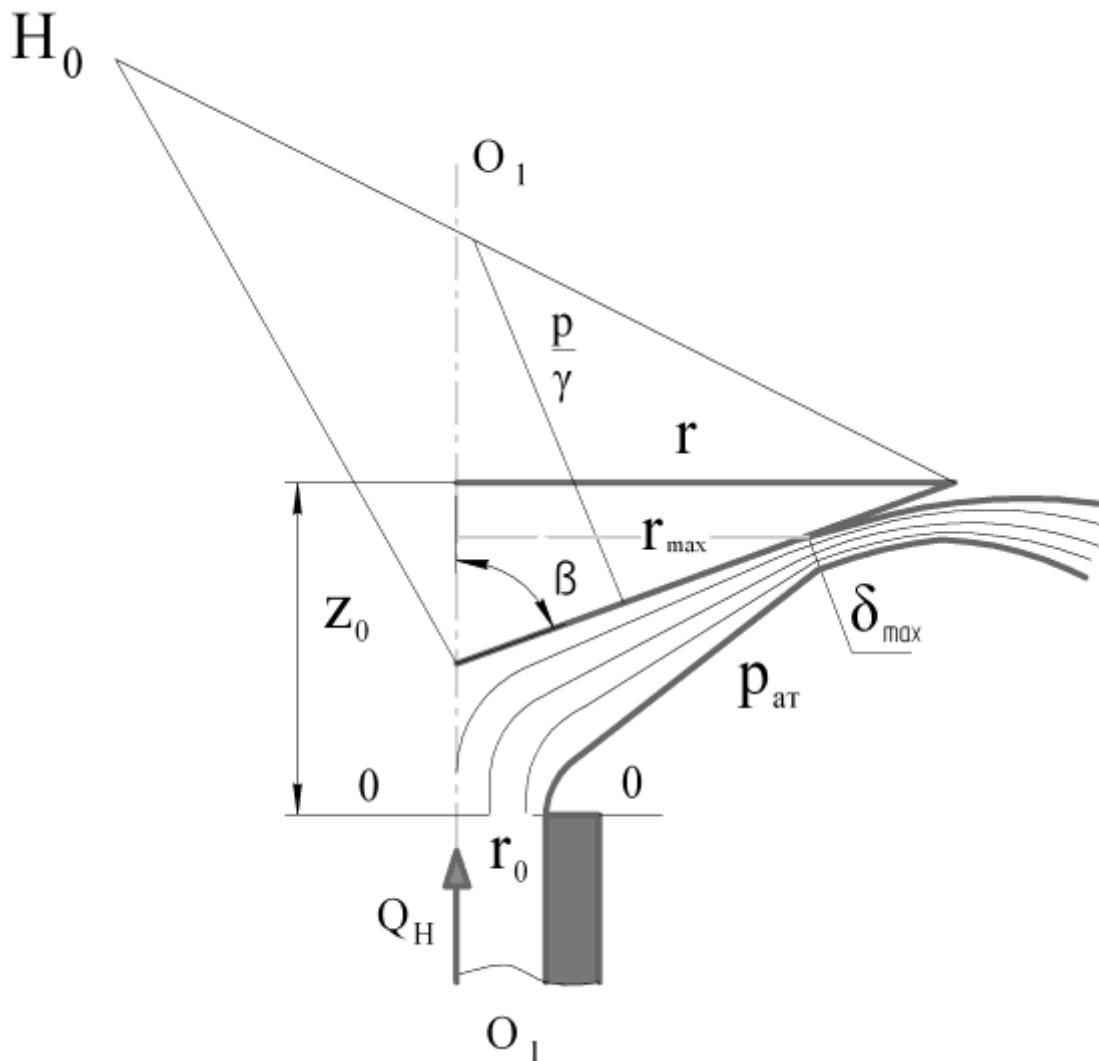


Рисунок 2.7 – Схема для определения максимального радиуса безотрывного течения

Каскадные дождеватели для приповерхностного полива

Увеличение производительности без изменения качества распыливания может быть обеспечено применением каскадных, многоярусных дождевателей (рис. 2.8).

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

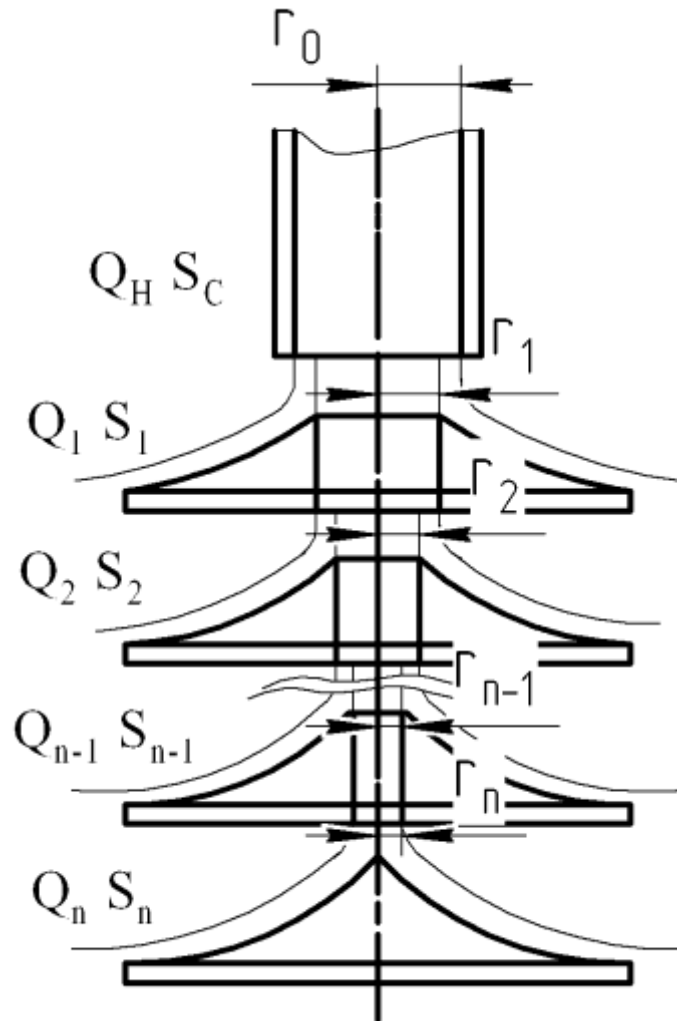


Рисунок 2.8 – Схема распределения расхода по дефлекторам каскадного дождевателя

Принимая расход из сопла насадки как Q_H , м³/с

$$Q_H = \mu \omega_0 V_0, \quad (2.21)$$

Расход, обеспечивающий сходящий поток первого дефлектора определяется площадью кольца

$$Q_{1H} = \mu\pi(r_0^2 - r_{1K}^2) V_0, \quad (2.22)$$

r_0 – радиус сопла дождевателя, м;

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

Для второго дефлектора
$$Q_{2H} = \mu\pi(r_{1K}^2 - r_{2K}^2) V_0, \quad (2.23)$$

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

Для предпоследнего дефлектора
$$Q_{n-1H} = \mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2) V_0, \quad (2.24)$$

Для последнего дефлектора
$$Q_n = \mu\pi r_n^2 V_0, \quad (2.25)$$

$$Q_H = Q_{1H} + Q_{2H} + \dots + Q_{(n-1)H} + Q_{nH}, \quad (2.26)$$

При обеспечении равного расхода с каждого дефлектора:

$$\begin{aligned} Q_{1H} = Q_{2H} = Q_{(n-1)H} = Q_{nH} &= \mu\pi(r_0^2 - r_{1K}^2) V_0 = \mu\pi(r_{1K}^2 - r_{2K}^2) V_0 = \\ &= \mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2) V_0 = \mu\pi r_n^2 V_0, \end{aligned} \quad (2.27)$$

$$Q_H = n_K \mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2) V_0 = \mu\pi R_0^2 V_0, \quad (2.28)$$

$$\mu\pi(r_{n-1}^2 - r_n^2) V_0 = \mu\pi r_n^2 V_0, \quad (2.29)$$

$$r_n = 0,71 r_{n-1}, \quad (2.30)$$

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 2.2.

Таблица 2.2 – 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 [49]:

$$d_K = 4,71 \cdot 10^{-2} d_0 Ga^{-0,59} Fr_0^{-0,5}, \quad (2.31)$$

где Ga – критерий Галилея; Fr_0 – критерий Фруда.

$$Ga = \frac{gd_0^3 \rho_B^2}{\nu^2}, \quad (2.32)$$

d_0 – диаметр сопла насадки, м.

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

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, м²/с.

Зависимость среднего объемно-поверхностного диаметра капель от давления на выходе из сопла дождевателя, построенная по (2.31) представлена на рис. 2.9. Резкое увеличение диаметра капель при снижении давления необходимо учитывать при выборе типа дождевателей, установленных в конце трубопровода машины, а также выборе регуляторов давления.

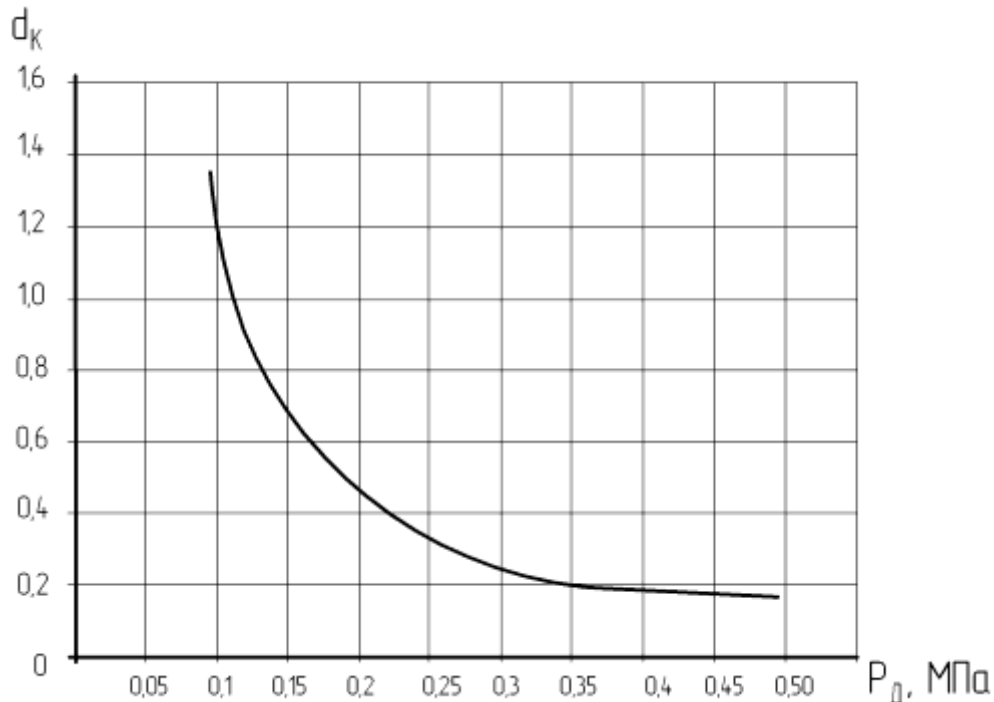


Рисунок 2.9 – Зависимость размера капель от давления на выходе из сопла: $d_0 = 5$ мм.

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 [48]:

$$d_K = \frac{c}{\omega} \sqrt{\frac{\sigma}{r\rho_B}}, \quad (2.33)$$

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 [48].

На рисунке 2.10 представлена зависимость (медианного) диаметра капель от окружной скорости вращения дефлектора, построенная по (2.33). 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.

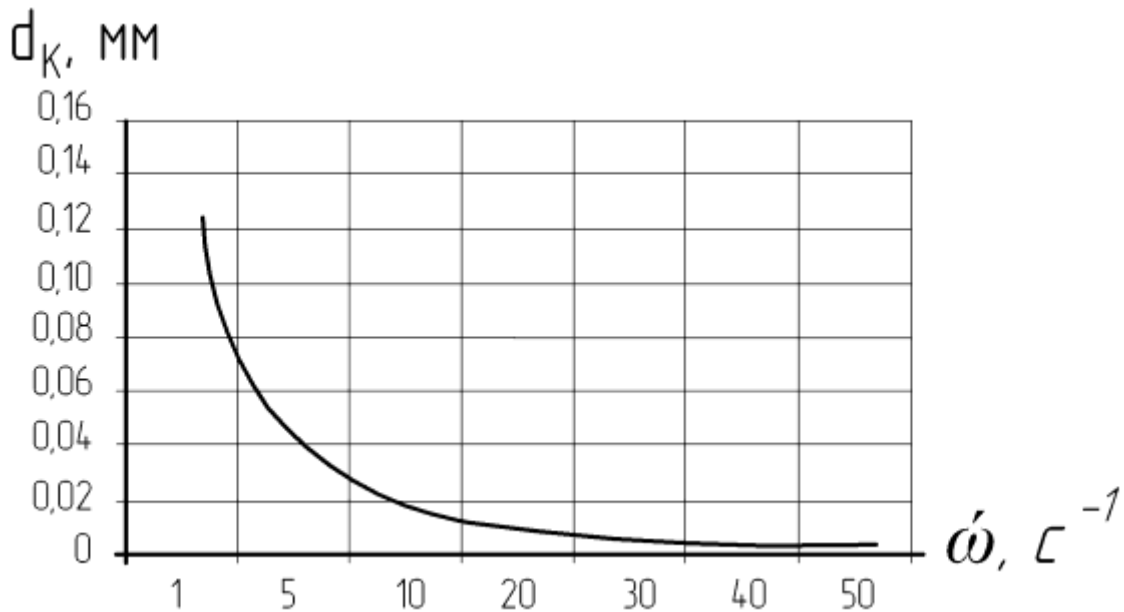


Рисунок 2.10 – Зависимость диаметра капель от угловой скорости дефлектора

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. 2.11), выражение для определения скорости воды V_1 при выходе с дефлектора будет иметь вид [3]:

$$V_1 = 0,75 \frac{\omega^{0,8} D^{0,4}}{B^{0,4}} \left(1 - \frac{0,9}{B^{0,92} \omega^{0,42} D^{1,43}} \right)^{0,4}, \quad (2.34)$$

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

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

r_K – радиус канавки, м;

ν – кинематический коэффициент вязкости воды, m^2/c .

Q_H – объемный расход, m^3/c ;

n_K – число канавок на дефлекторе, ед;

D' – диаметр дефлектора, м;

b – ширина канавки, м.

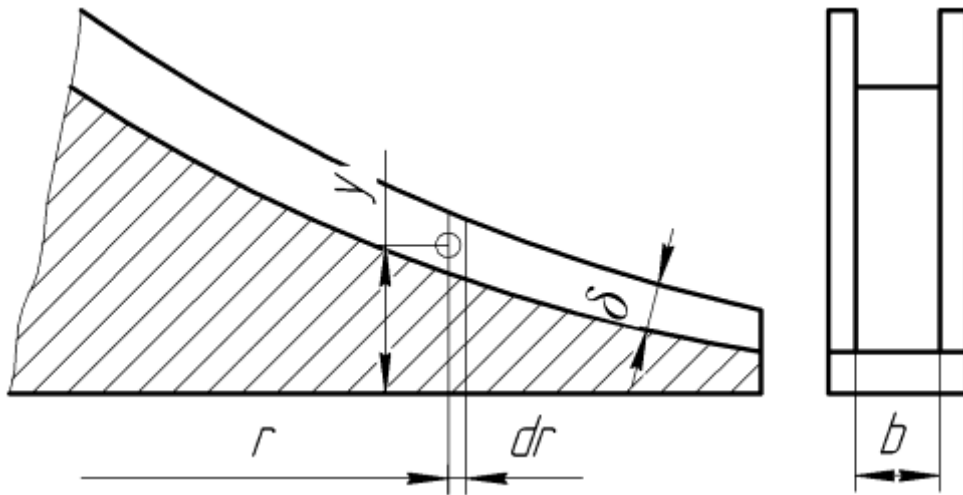


Рисунок 2.11 – Схема элемента вращающегося дефлектора:

y – вертикальная координата; r – радиальная координата; δ – толщина пленки жидкости

Увеличение расхода при прочих равных условиях ведет к увеличению радиальной скорости схода потока для всех типов дождевателей, а соответственно радиусу захвата дождем (рис. 2.12).

Рассмотрим влияние размера и количества канавок на дефлекторе. Из рисунка 2.13 видно, что увеличение радиуса канавок при малых расходах ведет к снижению радиальной скорости на сходе с дефлектора.

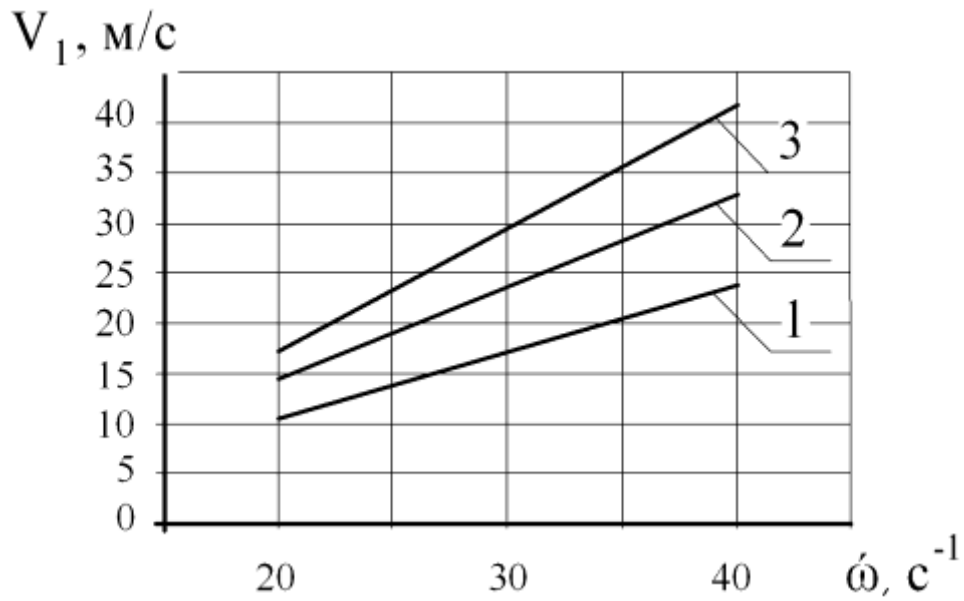


Рисунок 2.12 – Зависимость скорости V_1 от угловой скорости дефлектора ω при постоянных $r_K=1$ мм, $n_K=30$, $D'=0,06$ м: 1 – $Q_H=0,1$ л/с; 2 – $Q_H=1$ л/с; 3 – $Q_H=3$ л/с

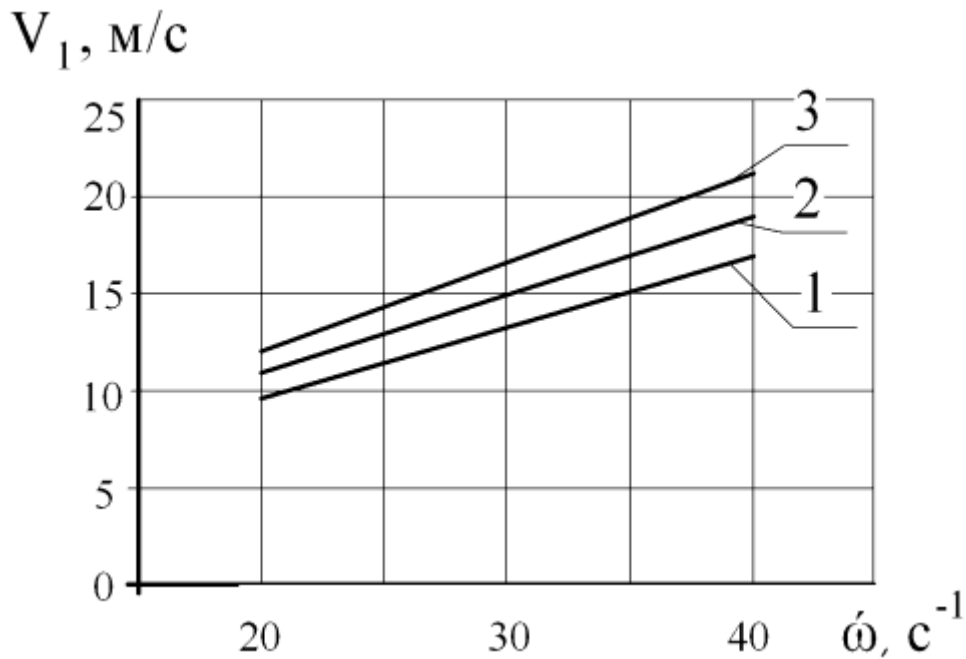


Рисунок 2.13 – Зависимость радиальной скорости V_1 от угловой скорости дефлектора ω при постоянных $n_K=40$, $D'=0,06$ м, $Q_H=0,5$ л/с: 1 – $r_K=5$ мм; 2 – $r_K=2$ мм; 3 – $r_K=1$ мм

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.

2.3 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 [3, 10, 11, 28, 35, 63-65].

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 [41, 48-49] механизм дробления жидкости, покинувшей дождеватель, 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. 2.14).

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

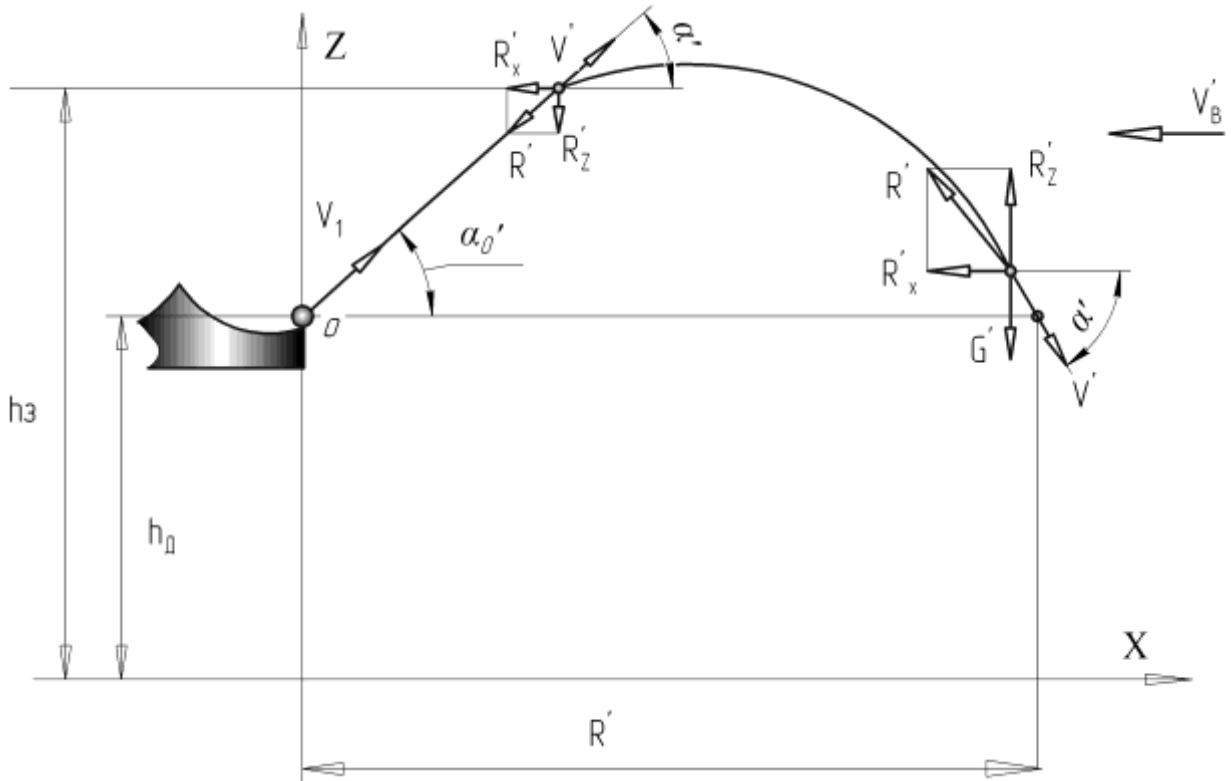


Рисунок 2.14 – Схема приложения сил и скоростей при сходе потока с дефлектора дождевателя

Дальность полета капль с учетом ветра можно определить из выражения [10]:

$$R' = \frac{1}{k_C} (V_1 \cos \alpha' + V_B' \cos \beta') (1 - e^{-tk_C}) - (V_B' \cos \beta) t, \quad (2.35)$$

высота подъема [35]:

$$Z = \frac{1}{k_C^2} \left[(g + k_C V_1 \sin \alpha') (1 - e^{-tk_C}) - \frac{g}{k_C} t \right], \quad (2.36)$$

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 :

$$k_c = \frac{24}{Re} + \frac{4,565}{\sqrt[3]{Re}} - \frac{0,491}{\sqrt{Re}}, \quad (2.37)$$

Расчетное значение числа Рейнольдса:

$$Re = \frac{V_1 d_K}{\nu_{\text{воз}}}, \quad (2.38)$$

где d_K – диаметр капли, м;

$\nu_{\text{воз}}$ – кинематическая вязкость воздуха, $\text{м}^2/\text{с}$ (при температуре воздуха 20°C $\nu_{\text{воз}}=15,7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$). Дальности полета капель в зависимости от наличия и направления ветра через 1с от начала движения представлены в таблице 2.4 (рис. 2.15).

Из таблицы 2.3 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.

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. 2.15-2.16.

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. 2.17.

Таблица 2.3 – 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, ($t=1\text{с}$)	Скорость ветра V'_B , м/с	Дальность полета против ветра R' , м, ($t=1\text{с}$)	Дальность полета по ветру R' , м, ($t=1\text{с}$)
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

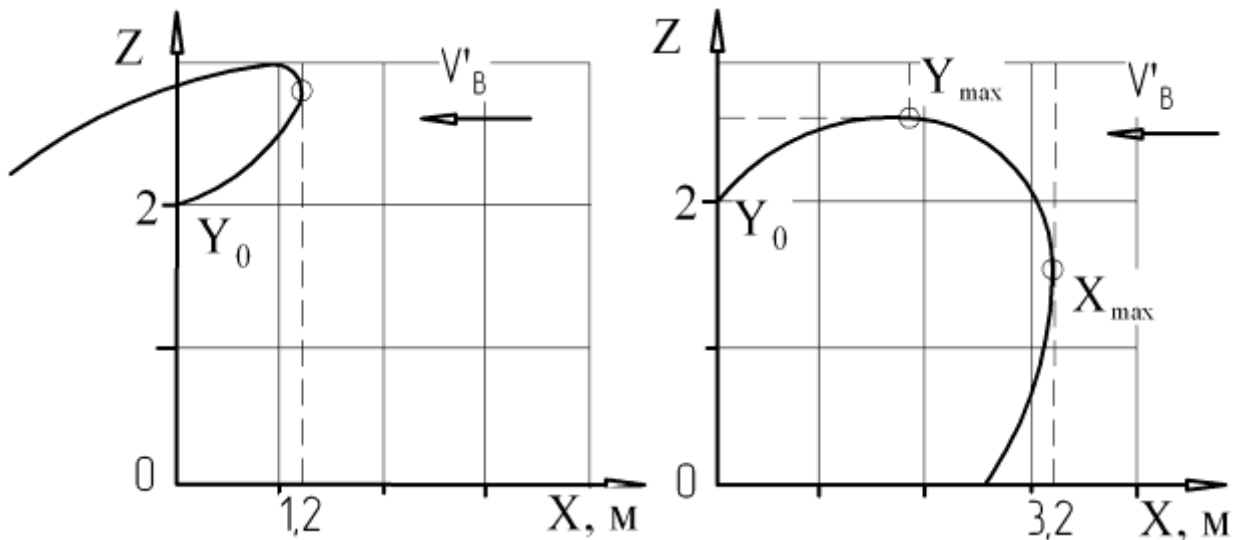


Рисунок 2.15– Траектории движения при встречном направлении ветра для каплей размерами: а) $d_k=0,3$ мм при $V_B =3$ м/с; б) $d_k=0,8$ мм при $V_B =3$ м/с

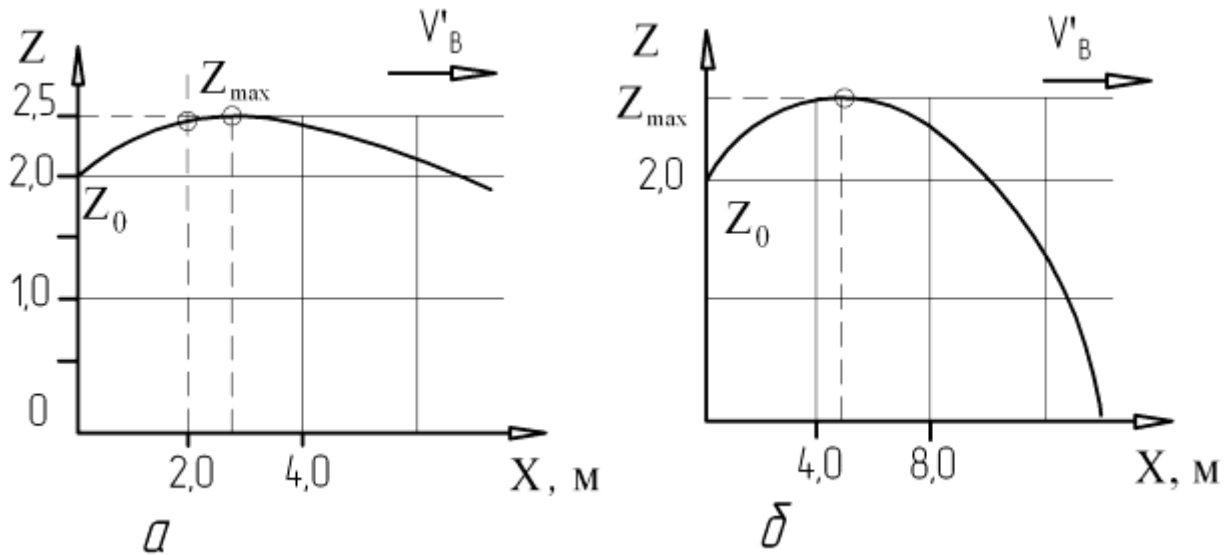


Рисунок 2.16 – Траектории движения при попутном направлении ветра для капель размерами: а) $d_K=0,3$ мм при $V_B=1,5$ м/с; б) $d_K=0,8$ мм при $V_B=1,5$ м/с

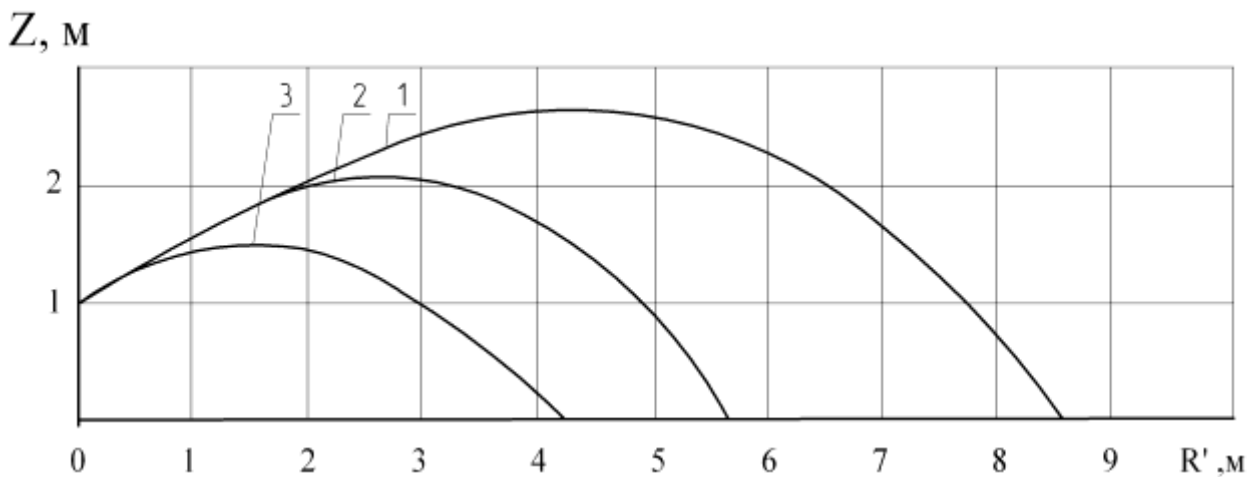


Рисунок 2.17 – Расчетные траектории движения капель при начальной скорости 15 м/с в попутном направлении ветра $V'_B=2$ м/с; $\alpha'=30^\circ$;
1 – $d_K=2$ мм; 2 – $d_K=1$ мм; 3 – $d_K=0,5$ мм;

Известно, что скорость ветра по высоте подчиняется логарифмическому закону [19]:

$$V_z = \frac{V_D}{\chi} \ln \frac{Z}{Z_0}, \quad (2.39)$$

где: V_D – динамическая скорость, м/с;

χ – постоянная Кармана ($\chi=0,38$);

\dot{Z}_0 – высота шероховатости (где $V_D = 0$, обычно равна 20% высоты растительного покрова, но не менее 0,03).

Согласно нормативам [73], скорость ветра при испытаниях дождевальных машин, определяется на высоте 2м. Тогда зависимость будет иметь вид:

$$V_2 = \frac{V_D}{0,38} \ln \frac{2}{\dot{Z}_0}, \quad (2.40)$$

тогда

$$V_D = 0,38 V_2 \ln \frac{2}{\dot{Z}_0}, \quad (2.41)$$

Поскольку $V'_B = V_D$,

$$R' = \frac{1}{k_C} \left(V_1 \cos \alpha' + 0,38 \cos \beta V_2 \ln \frac{2}{\dot{Z}_0} \right) (1 - e^{-tk_C}) - \left(0,38 V_2 \ln \frac{2}{\dot{Z}_0} \cos \beta \right) t. \quad (2.42)$$

Рассматривая влияние угла вылета струи на дальность полета, легко можно определить рациональный угол в зависимости от скорости ветра (рис. 2.18).

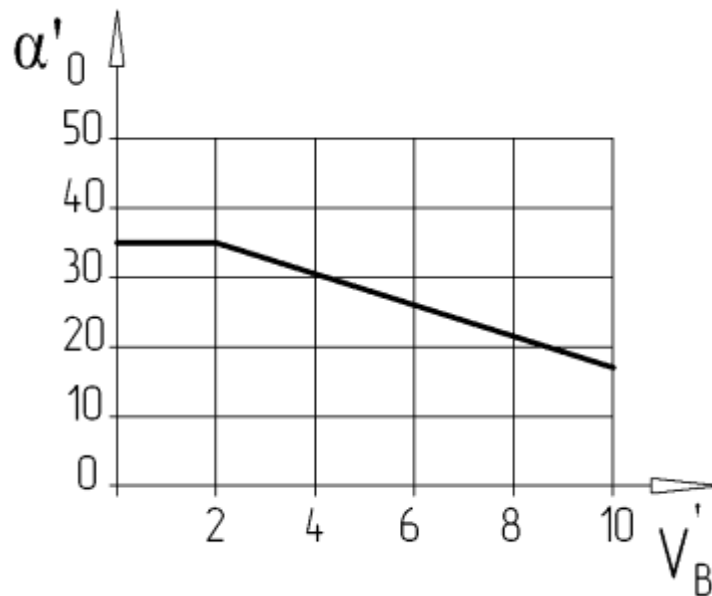


Рисунок 2.18 – Схема к определению рационального угла вылета струи к горизонту в зависимости от скорости ветра

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

2.4 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} :

$$V(d_{ki}) = \frac{d_{ki}^3 n_i}{\Delta d_k \sum_{i=1}^{m'} d_{ki}^3 n_i}, \quad (2.43)$$

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. 2.19).

$$q_a = \sum_{i=1}^{m'} V(d_{ki}), \quad (2.44)$$

$$q_a = p_1 q_{1a} + p_2 q_{2a} + \dots + p_i q_{ia} \quad (2.45)$$

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.

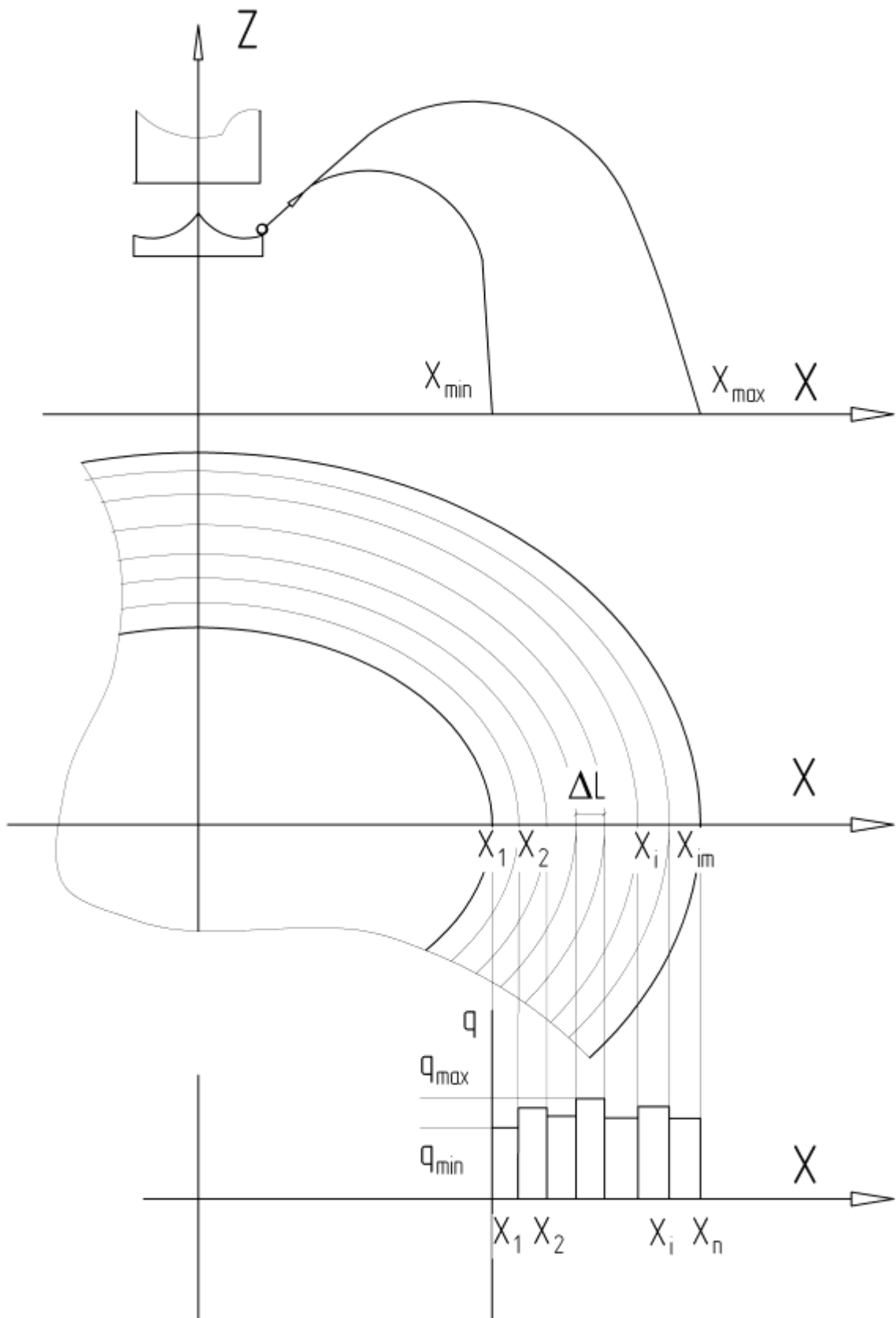


Рисунок 2.19 – Форма орошаемой площади и распределение расхода жидкости с учетом метеорологических условий

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 $K_{\text{нп}} \leq 0,15$ [47, 73].

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 [19], рекомендует уменьшать расстояние между позициями дождевателей в зависимости от ветровых режимов.

При наличии нестабильных ветровых режимов:

$$L_{\text{д}} = 1,42\varepsilon R', \quad (2.46)$$

$L_{\text{д}}$ – 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 [19] 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 [63-65] с целью снижения вероятности засорения дефлектора мусором высота ножек дефлектора должна соответствовать условию $h_H \approx d_0$.

Низконапорные дождеватели были изготовлены следующих типов:

Дождеватель Тип 1 выполненные из оцинкованной стали (рис. 2.20).

Дождеватель Тип 2 выполненные из полиамида ПА-6 (рис.2.21).

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.



Рисунок 2.20 – Дождеватель из оцинкованной стали типа 1, сменные дефлекторы разной геометрии

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.





Рисунок 2.21 – Дождеватель из полиамида ПА-6 -Тип 2. Исполнение 1.
Общий вид насадки

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 (рис. 2.22):

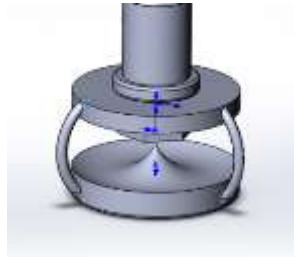
- 1 – с гладким статическим дефлектором;
- 2 – со статическим дефлектором с канавками треугольной формы (шириной от 1,5 до 5 мм);
- 3 – со статическим дефлектором с канавками полукруглой формы (менялась ширина канавок от 2 до 5мм и глубина от 2до 6 мм);
- 4 – с вращающимися дефлекторами треугольными канавками (ширина

канавок менялась от 1,5 до 5 мм и глубина от 2 до 6 мм);

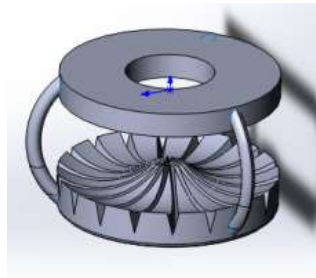
5 – с вращающимися дефлекторами полукруглыми канавками (ширина канавок от 2 до 5 мм и глубина от 2 до 6 мм);

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

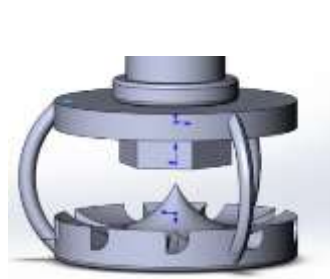
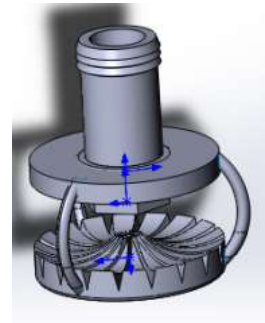
Для подтверждения теоретических исследований необходимо провести ряд испытаний по определению качественных показателей полива различных типов дождевателей.



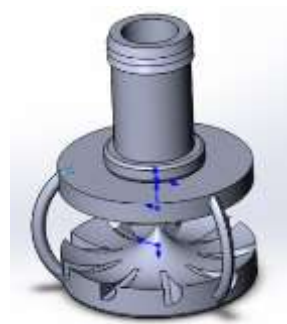
Исполнение 1

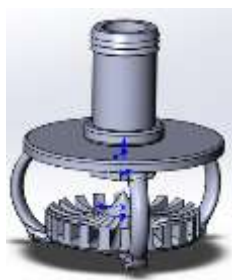


Исполнение 2

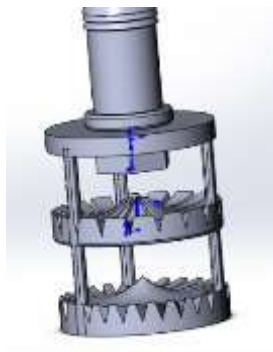
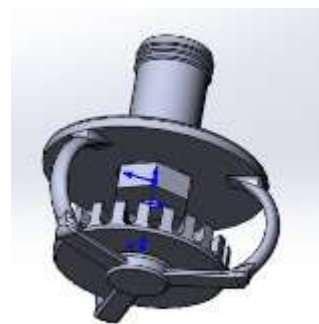


Исполнение 3





Исполнение 4-5



Исполнение 6

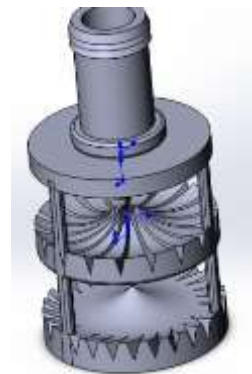


Рисунок 2.22 – Исполнение дождевателей



Рисунок 23 –Каскадный дождеватель

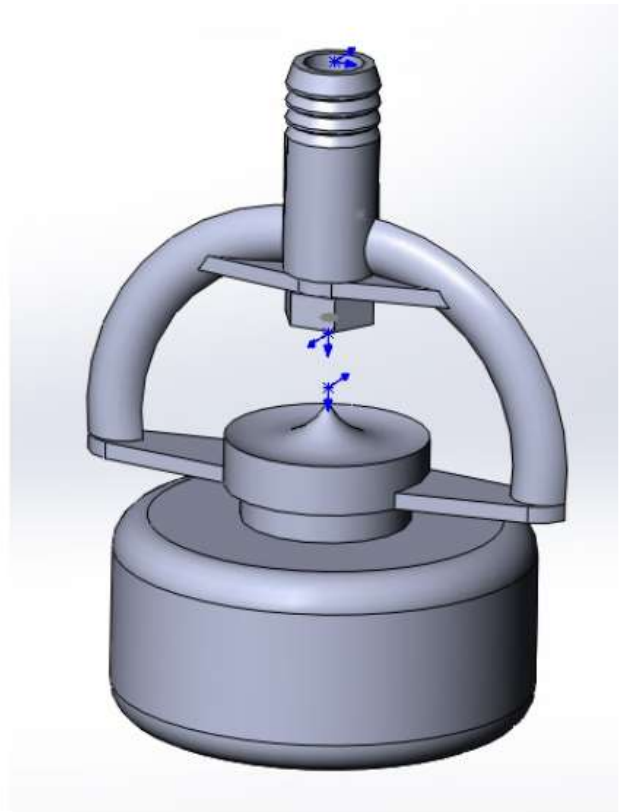


Рисунок 24 - Дождеватель с грузом снизу



Рисунок 25-Дождеватель с канавками



Рисунок 26-Распыливание воды



Рисунок 27 – Комплекты дождевателей

3 КРАТКАЯ ПРОГРАММА И МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ И ПОЛЕВЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полученные теоретические положения проверялись в лабораторно-полевых и производственных условиях.

Основная программа экспериментальных исследований включала в себя:

- лабораторные исследования характеристик дождевателей;
- полевые исследования качественных показателей полива широкозахватных дождевальных машин кругового действия, оборудованных разработанными низконапорными дождевателями.

Программа проведения лабораторных исследований включала в себя:

- определение расходно–напорных характеристик дождевателей;
- определение радиуса захвата дождем и высоты подъема капель дождя в зависимости от конструктивных параметров дождевателей и режимов работы;
- исследование средней и мгновенной интенсивности дождя, крупности капель и их распределения вдоль радиуса и на площади полива.

Программа проведения полевых исследований включала в себя:

- определение равномерности полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия с установленными низконапорными дождевателями;
- исследование потерь воды на испарение и снос;
- определение влажности почвы, нормы полива до стока дождевальных машин с разными схемами установки дождевателей;

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.3.1-3.2).

Давление устанавливается регулировочным краном 6 и замеряется 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.

Технические средства: образцовый манометр ГОСТ2405-88, секундомер ГОСТ 1197-70, анемометр ручной крыльчатый АСО-3, рулетка RemoColor, №5006, психрометр аспирационный М-34 Ассмана.

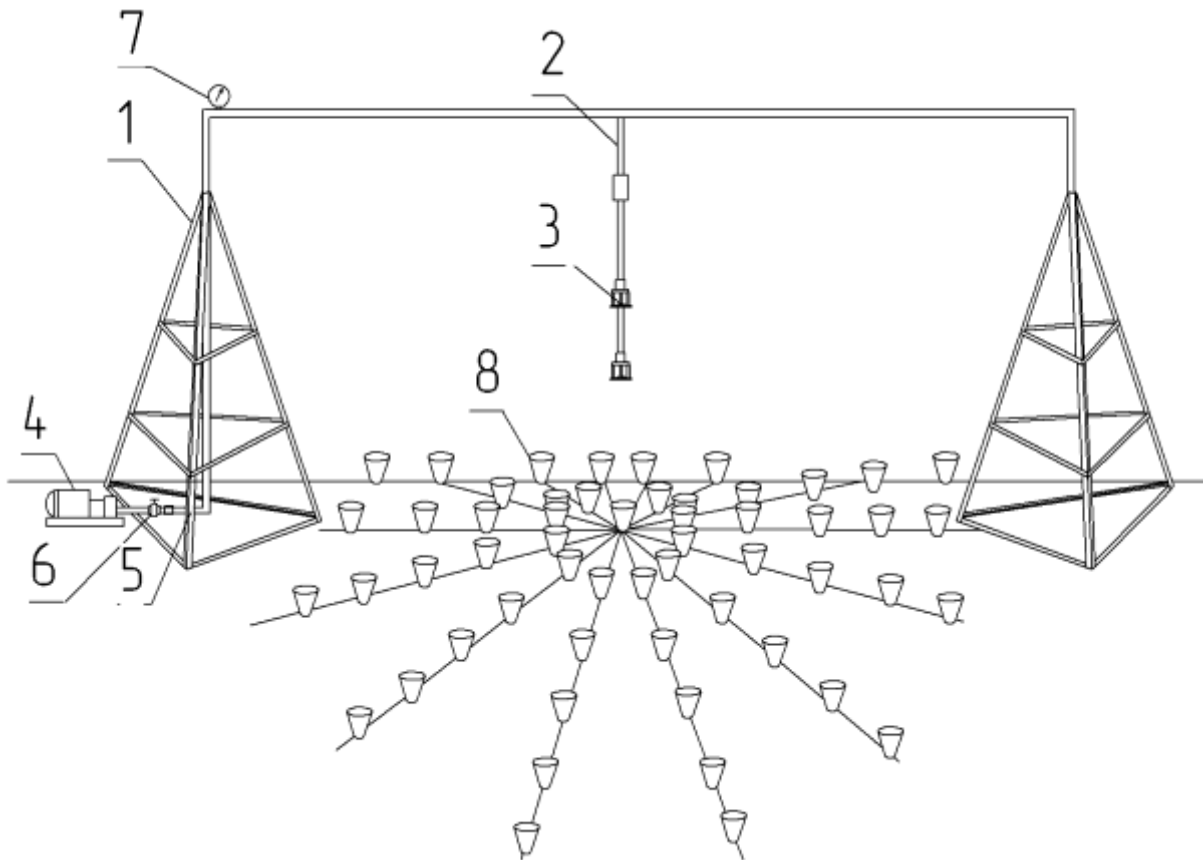


Рисунок 3.1 – Схема стенда для испытаний дождевателей



Рисунок 3.2 – Стенд для испытаний дождевателей

Схемы расстановки дождевателей

Для исследований качественных показателей полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия, они были оснащены по следующим схемам расстановки дождевателей:

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 дефлектором гладким).

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 дефлектором гладким).

3. Установка через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,35 МПа ДМ «КАСКАД» модели 497-90 дождевателями типа 2 исполнения 2 (из полиамида с дефлектором с канавками треугольной формы).

4. Установка через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,3 МПа ДМ «КАСКАД» модели 497-90 дождевателей типа 2 исполнения 5 (из полиамида с вращающимися дефлекторами и полукруглыми канавками) с 1/2 водопроводящего пояса и исполнения 1 до 1/2 водопроводящего пояса (с гладкими дефлекторами).

5. Установка через 4,5 м при напоре на входе в машину 0,35 МПа ДМ «КАСКАД» длиной 434 м через 4,5 м дождевателями типа 2 исполнения 6 (из полиамида с двумя дефлекторами) с 2/3 водопроводящего трубопровода и исполнения 2 типа 2 (с дефлекторами с канавками) до 2/3.

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 дождевателями типа 1 исполнения 1 (стальные оцинкованный с дефлектором гладким).

Экспериментальные исследования низконапорных дождевателей

Лабораторные исследования проводились в соответствии с требованиями СТО АИСТ 001–2010 и методиками [15, 16, 72, 73].

Испытательный стенд представлен на рис. 3.3. 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). Расход определялся по формуле 3.5.

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.

Для измерения скорости ветра использовался анемометр ручной крыльчатый АСО-3, позволяющий определять скорость ветра в диапазоне 0,1-5 м/с. Делением разности конечного и начального показания счетчика анемометра на время экспозиции определялось количество делений, приходящихся на 1с, а затем по калибровочному графику находилась скорость ветра.

Определение направление ветра осуществлялось через каждые 5-15 минут в период опыта и фиксировалось в ведомости.

Для измерения относительной влажности воздуха использовался психрометр аспирационный М-34 Ассмана. По разнице показателей определялась относительная влажность воздуха по психрометрической таблице.

Средняя действительная интенсивность $\rho_{\text{ср}}$, мм/мин определялась делением расхода воды $Q_{\text{н}}$ на мгновенную площадь полива :

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{60Q_{\text{н}}}{\pi R'^2}, \quad (3.1)$$

где $Q_{\text{н}}$ – расход воды, л/с;

R' – радиус захвата дождем, м;

Диаметр капель дождя определялся с помощью обеззоленных бумажных фильтров, натертых чернильным порошком. Связь между отпечатком капель и их диаметром устанавливалась по тарировочной кривой [64]:

$$d_K = C_{KB} \sqrt[3]{d_{OK}^2}, \quad (3.2)$$

где d_K – фактический диаметр капель;

C_{KB} – коэффициент качества бумаги.



Рисунок 3.3 – Испытание дождевателей

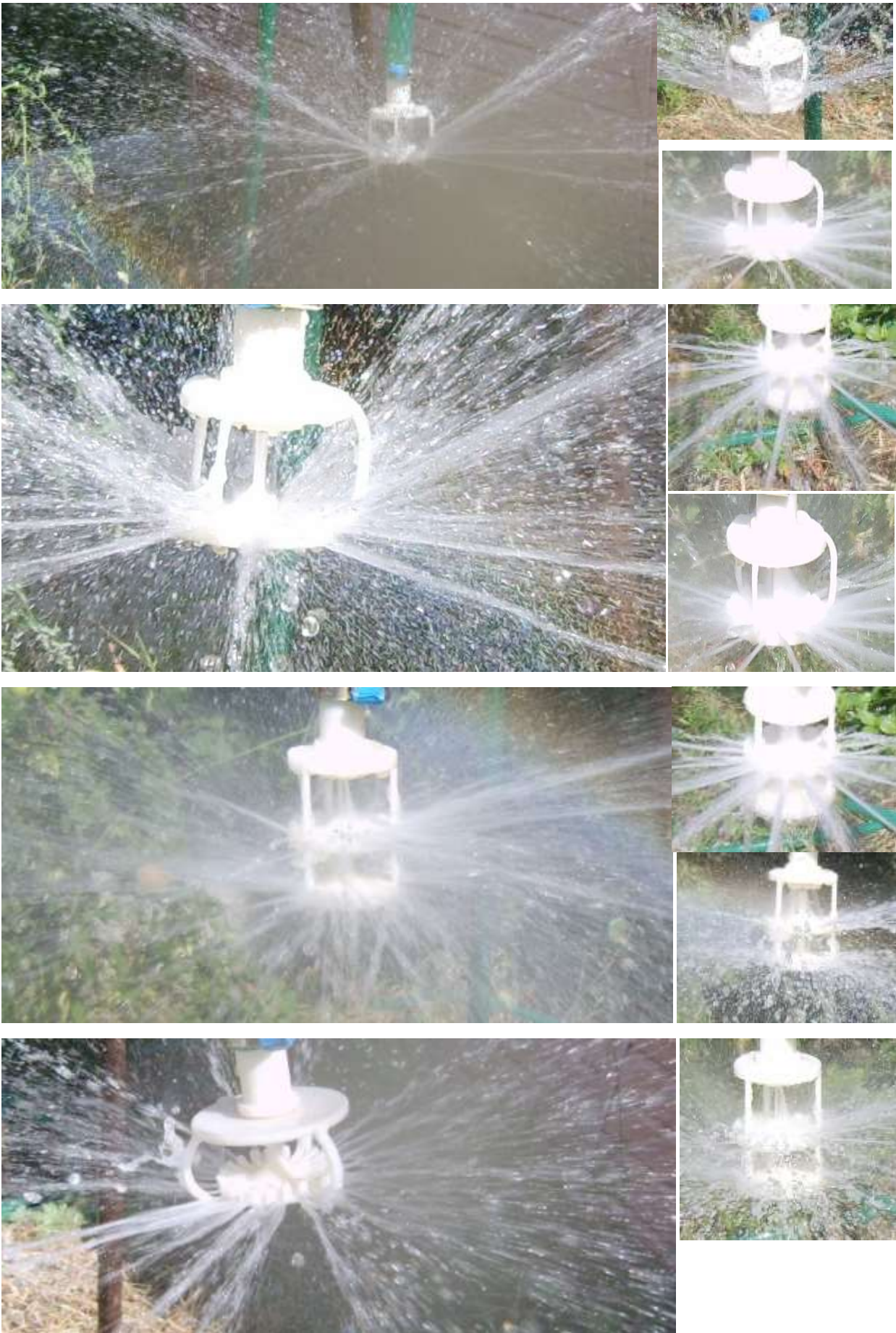


Рисунок 3.4 – Формы дефлектора, режимы и формы сходящего потока



Рисунок. 3.5 – Расстановка дождемеров при лабораторных исследованиях

$$C_{\text{КБ}} = \sqrt[3]{\frac{3k_{\text{ПБ}}\delta_{\text{Б}}}{2}}, \quad (3.3)$$

$k_{\text{ПБ}}$ – коэффициент пористости бумаги;

$\delta_{\text{Б}}$ – толщина бумаги, мм;

$d_{\text{ОК}}$ – диаметр отпечатка капли, мм.

Как показывают опыты, коэффициент $C_{\text{КБ}}$ остается постоянным для данного сорта бумаги. В дальнейшей по данной формуле строится тарировочная кривая.

Диаметр отпечатка капли на фильтре измерялся микроскопом по вертикали и горизонтали с точностью измерений 0,1 мм.

В результате проведения теоретических расчетов и практических замеров диаметра капель дождя сравнивались и определялись отклонения от расчетных значений по зависимости:

$$\Delta d_{\text{К}} = \frac{d_{\text{Кр}} - d_{\text{Коп}}}{d_{\text{Кр}}} \cdot 100\%, \quad (3.4)$$

$d_{\text{Кр}}$ – теоретическое значение диаметра капли, мм;

$d_{\text{Коп}}$ – значение полевого опыта диаметра капли, мм.

В большинстве случаев теоретические расчеты имеют допустимое отклонение до ($\pm 10\%$), что говорит об достаточной точности.

Для обработки отбирались по 100-120 капель в начале, середине и конце струи. Отбор капель дождя производился на высоте 0,8-1,0 м от поверхности почвы.

Улавливание на один лист капель в различных местах дождевого облака позволило определить процентное соотношение капель различного диаметра, а также средний диаметр и сравнить полученные данные с теоретическими расчетами.

Для оценки равномерности полива по эпюрам распределения интенсивности дождя вдоль радиуса полива использовали:

- коэффициент эффективности полива по 100-120 замерам [73];
- коэффициент неравномерности полива [63]:

$$K_H = \Sigma (| \rho_i - \rho_{\text{ср}} |) \cdot K_i / (\rho_{\text{ср}} \cdot \Sigma K_i), \quad (3.5)$$

где ρ_i – значения интенсивности дождя в i -ой точке радиуса, мм/мин;

$\rho_{\text{ср}}$ – среднее значение интенсивности дождя вдоль радиуса полива, мм/мин;

K_i – коэффициент площади дождемера, оценивающего i -ю точку радиуса.

- коэффициент равномерности по Кристиансену [64]:

$$\sigma_0 = 100 \left(1 - \frac{\Sigma / h_i - h_{\text{ос}} /}{h_{\text{ос}} \cdot n_{\text{изм}}} \right), \quad (3.6)$$

где $/ h_i - h_{\text{ос}} /$ – абсолютная величина отклонения измерения от среднего слоя осадков, мм;

$h_{\text{ос}}$ – средний слой осадков, мм;

$n_{\text{изм}}$ – число измерений.

Соответствие теоретических расчетов фактическим значениям распределения дождя дождевателем, оценивалось критерием Пирсона X^2 [21]:

$$X^2 = \Sigma (\rho_{\text{ф}} - \rho_{\text{т}})^2 / \rho_{\text{т}}, \quad (3.7)$$

где ρ_f , ρ_t – фактическое и теоретическое значение интенсивности дождя в i –ой точке радиуса полива, мм/мин.

Экспериментальные исследования качественных показателей полива широкозахватных дождевальных машин оборудованных низконапорными дождевателями

Полевые исследования проводились на полях УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ (с. Степное Энгельского района Саратовской области), УНПК Агроцентра СГАУ; ООО «Наше дело» (Саратовская область, Марковский район).

Сертификационные испытания ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) были проведены на соответствие требованиям ТУ 473422-002-26833660-2016 по рабочей программе-методике, утвержденной 01.07.16 г. главным инженером

Таблица 3.1 – Условия полевых испытаний в ООО «Наше дело» (Саратовская область, Марковский район)

Показатель	Значение показателя по:			
	ТУ	Данным испытаний		
		Лабораторно-полевых	Эксплуатационно-технологических	На надежность
Вид работы	Полив кормовых, зерновых, технических культур, включая высокостебельные	Полив кукурузы		
Тип почвы и название по механическому составу	Все типы почв	Темно-каштановый суглинок		
Общий уклон участка, %	-	0		
Уклон вдоль трассы трубопровода	То же	0		
Уклон по ходу движения машины	-	0		
Микрорельеф	-	слабовыраженный		

Наименьшая влагоемкость почвы, %	-	11,3		
Влажность почвы, %, в слое, см:				
0-10		8,9	8,9	7,4-10,6
10-20		11,8	11,8	10,9-12,3
20-30		12,8	12,8	12,5-13,0
30-40		11,2	11,2	10,8-12,3
40-50		12,8	12,8	11,7-13,5
Твердость почвы, МПа, в слое, см:	-			
0-10		2,8	2,8	2,7-2,8
10-20		3,9	3,9	3,8-3,9
20-30		3,9	3,9	3,8-3,9
30-40		4,0	4,0	4,0-4,1
40-50		4,0	4,0	4,0-4,1
Температура воздуха, °С	+5 – +45	25,0	25,0	23-25,0
Относительная влажность воздуха, %	-	45	45	44-46
Температура воды, °С	-	22,0	22,0	21,0-33,0
Наименование культуры	с/х культуры	кукуруза		
Фаза развития растений	-	цветение		
Высота растений, см	-	166,2	166,2	160,0- 173,0
Число растений, тыс. шт/га	-	104	104	80-120
Содержание в воде взвешенных частиц, г/л (мг/л), не более	5	0,1	0,1	0,05-0,1
Предшествующая обработка почвы	Нет данных	Без обработки		

Показатели условий испытаний определены по ГОСТ 20915-2011 и СТО АИСТ 11.1-2010. Технические средства измерения представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Технические средства проведения испытаний

Наименование определяемой характеристики, параметра	Наименование испытательного оборудования, прибора, его номер, ГОСТ
Линейные параметры	Рулетка RemoColor, №5006; Штангенциркуль ШЦ-П 0-250-0,05 №311313; Мерный циркуль, №0940; Дальномер лазерный LeikaDistopro, №263532
Весовые параметры	Весы GM-612, №13809603

Время	Секундомер СОСпр-26-2-000№5018
Расход	Манометр дифференцированный ДТ-50№359311 ТУ-25-01-818
Давление	Манометр МТ-100
Температура	Термометр лабораторный, ТЛ-4, №588
Твердость почвы	Твердомер Ревякина, №138
Влажность почвы	Сушильный шкаф СШ-3
Влажность воздуха	Психометр МВ-4, №7936
Рельеф	Угломер КИ13926№ 1949
Скорость ветра	Анемометр чашечный МС-13№8716
Расход топлива	Расходомер топлива DFM 100СК, №635 0560

Фактическая средняя норма полива, $\text{м}^3/\text{га}$, после прохода дождевальнoй машины определялась по формуле:

$$m_{\text{ф}} = 10 \cdot h_{\text{ос}}, \quad (3.8)$$

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 см^2 и объемом 3 л, которые расставлялись в радиальном направлении в 2...3 ряда с центральным углом $3-5^\circ$ 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.

Коэффициенты эффективного, недостаточного и избыточного полива определялись по частотному графику распределения слоя дождя вдоль водопроводящего трубопровода. При построении частотного графика использовались значения коэффициентов площади под каждым дождемером. Площадь полива под i -м дождемером [64]:

$$S_{i\text{д}} = \pi (R_{i+1}^2 - R_i^2) / n_{\text{рд}}, \quad (3.9)$$

где $R_{i\text{д}}, R_{i+1}$ – величина радиуса от неподвижной опоры до центра интервала между $i+1$ и i -м дождемером, м;

$n_{\text{рд}}$ – число рядов дождемеров, шт.

Отношение площади i -го кольца к площади первого кольца обозначили коэффициентом площади дождемера $K_{i\text{д}}$:

$$K_{iД} = S_{iД} / S_{1Д} \quad (3.10)$$

Значения коэффициентов принимают целые значения $K_{iД}=1, 3, 5, 7, 9, \dots$

Для частотного графика:

1. Определялось распределение слоя дождя на участке поля [64]:

$$h_{OC} = \frac{10 \cdot V_d}{S_d}, \quad (3.11)$$

где h_{OC} – слой дождя; мм;

V_d – объем воды в дождемере, мл;

S_d – приемная площадь дождемера, cm^2 .

2. Выбиралось минимальное h_{min} и максимальное h_{max} значение и определялась величина интервала [64]:

$$J = \frac{h_{OCmax} - h_{OCmin}}{10 \dots 12}, \quad (3.12)$$

где 10-12 – число интервалов.

3. Определялся коэффициент площади $K_{iД}$ под каждым дождемером.

4. По данным построился частотный график распределения слоя дождя и отклонение от него в пределах $\pm 25\%$ – площадь эффективного полива $F_{эф}$. Как отклонения от нее – площадь недостаточного полива F_n , и площадь избыточного полива $F_{из}$. Численные значения этих площадей определяли планометрированием частотного графика [73]. Отношение указанных площадей к общей площади дает соответствующие значения коэффициентов распределения дождя.

Равномерность полива на небольших участках с числом замеров 30-40 оценивалась коэффициентом вариации:

$$KB = (\sigma_{от} / h_{OC}) \cdot 100\%, \quad (3.13)$$

где $\sigma_{от}$ – среднеквадратичное отклонение,

$$\sigma_{от} = \left[\frac{(h_i - h_{CP})}{n_{изм} - 1} \right]^{0.5}, \quad (3.14)$$

h_i , h_{CP} – слой дождя в i -м дождемере и средний на участке полива, мм; $n_{изм}$ – число измерений слоя дождя, шт.

Давление на входе в машину определяли по манометру. Скорость ветра в течение опыта замерялась ручным анемометром, который устанавливался на расстоянии 100-200 м от машины на высоте 2 м.

Методика определения потерь воды на испарение и снос

Величина потерь на испарение и унос ветром оценивалась по разнице между объемами воды, поданными дождевальными машинами и собранными у поверхности почвы с помощью дождемеров. Для сбора воды с поверхности почвы были изготовлены специальные пробоотборники, представляющие собой воронку, помещенную в стеклянную бутылку. С целью снижения испарения воды, собранной в пробоотборники, бутылка оборачивалась в два слоя хлопчатобумажной тканью.

Величину потерь дождя и сноса ветром определяли по формуле [63- 65]:

$$E_{\text{ис}} = \frac{m_p - m_{\text{ф}}}{m_{\text{ф}}} \cdot 100\%, \quad (3.15)$$

где m_p , $m_{\text{ф}}$ – расчетная и фактическая поливная норма, мм.

Фактическая поливная норма определялась при помощи дождемеров и мерной мензурки сразу после полива дождевальной машины.

Скорость падения капель дождя определялась по методике А.П. Исаева [33] 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 [73].

При выборе участка для проведения агрооценки исходили из условия, что высота растений не должна превышать высоты дождемеров. Для оценки показателей качества площадь орошения разбивали на равновеликие площадки с помощью мерной ленты или теодолита. Количество площадок должно входить целым числом в площадь полива с перекрытием. В центрах площадок устанавливали дождемеры по радиусу на всю ширину захвата машины без

перекрытия. Расстояние между центрами дождемеров не более 2 м. Измерение выполняли на трех лучах, расположенных друг от друга под углом 30° на расстоянии 10-12м.

Для определения рабочей скорости измеряли длину пути и продолжительность движения машины вперед (назад) за повторность опыта. Измерения выполняли в трехкратной повторности на каждом заданном режиме.

Определение влажности почвы

Влажность почвы определяли до и после поливов в слое 0-100 см через 10 см в трехкратной повторности и рассчитывали по формуле [35]:

$$V_{\text{п}} = \frac{100 \cdot m_{\text{в}}}{m_{\text{СП}}} = 100 \frac{m_{1\text{С}} - m_{0\text{С}}}{m_{0\text{С}} - m_{\text{С}}}, \quad (3.16)$$

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 ± 2) °С в течение 5 ч, рис. 3.6.

При выборе местоположения опытных площадок учитывалась однородность почвенного покрова, рельефа и технология возделывания сельскохозяйственных культур. Сток воды определялся по общепринятой методике по стоковым площадкам площадью 1000 см². Площадки располагали на повышенных элементах микрорельефа поля с тем, чтобы промачивание

почвы осуществлялось только водой, успевающей впитываться в процессе дождевания.



Рисунок 3.6 – Измерения влажности почвы

Норма полива до стока в зоне полива дождевателей определялась по моменту образования устойчивых луж на поверхности поля [40].

При проведении опыта определялись также: средняя и мгновенная интенсивность дождя; средний диаметр капель дождя; тип почв; механический состав в слое 0-50 см; объемная масса почвы по слоям и в слое 0-50 см; предполивная влажность почвы в слое 0-50 см; уклон поверхности почвы; наличие почвенной корки; вид сельскохозяйственного растения и густота их стояния; вид основной и дополнительной обработки почвы.

Обработка результатов экспериментальных исследований и определение статистических характеристик

Для оценки достоверности экспериментальных данных применены методики планирования эксперимента и методы математической статистики [9, 21]. Все экспериментальные значения параметров обрабатывались методами математической статистики. Распределение параметров $X_1, X_2, X_3, \dots, X_i$ характеризовалось:

Средней величиной распределения

$$X = \Sigma X_i / n_{\text{ИЗМ}}, \quad (3.17)$$

где X_i - результат отдельного измерения;

$n_{\text{ИЗМ}}$ – число измерений.

Дисперсией распределения:

$$D = \frac{\Sigma (X_i - \bar{X})^2}{n_{\text{ИЗМ}} - 1}; \quad (3.18)$$

Среднеквадратичным отклонением:

$$\sigma_{\text{от}} = D^{0,5}; \quad (3.19)$$

Коэффициентом вариации:

$$KB = \frac{100 \cdot \sigma_{OT}}{\bar{X}}; \quad (3.20)$$

Точностью опыта:

$$P_{оп} = \frac{100 \cdot \sigma_{OT}}{\bar{X} \cdot n_{ИЗМ}^{0,5}}. \quad (3.21)$$

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

$$(Y_i - Y_p)^2 = \min, \quad (3.22)$$

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:

$$\left(\frac{X_i}{R} \right)_{\max} = \frac{\gamma - 1}{(\gamma + \eta + 2)}. \quad (3.23)$$

Параметры γ и η связаны со средней величиной X и среднеквадратичной величиной распределения σ_C следующими зависимостями:

$$\eta = [(1 - X)/\sigma_C^2] \cdot [X \cdot (1 - X) - \sigma_C^2], \quad (3.24)$$

$$\gamma = X \cdot \eta / (1 - X). \quad (3.25)$$

Остаточная дисперсия:

$$D_{ост}^2 = \sum (Y_{\phi} - Y_p)^2 / (N - V_{\phi} - 1), \quad (3.26)$$

где V_{ϕ} - количество факторов.

Оценка адекватности уравнения регрессии осуществлялась по критерию Фишера:

$$F = D^2 / D_{ост}^2, \quad (3.27)$$

Коэффициент множественной корреляции:

$$R_m = (1 - D_{ост}^2 / D^2)^{0,5}. \quad (3.28)$$

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4.1 Результаты исследований 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.

Характеристика расход-давление дождевателей показана на графике (рис. 4.1).

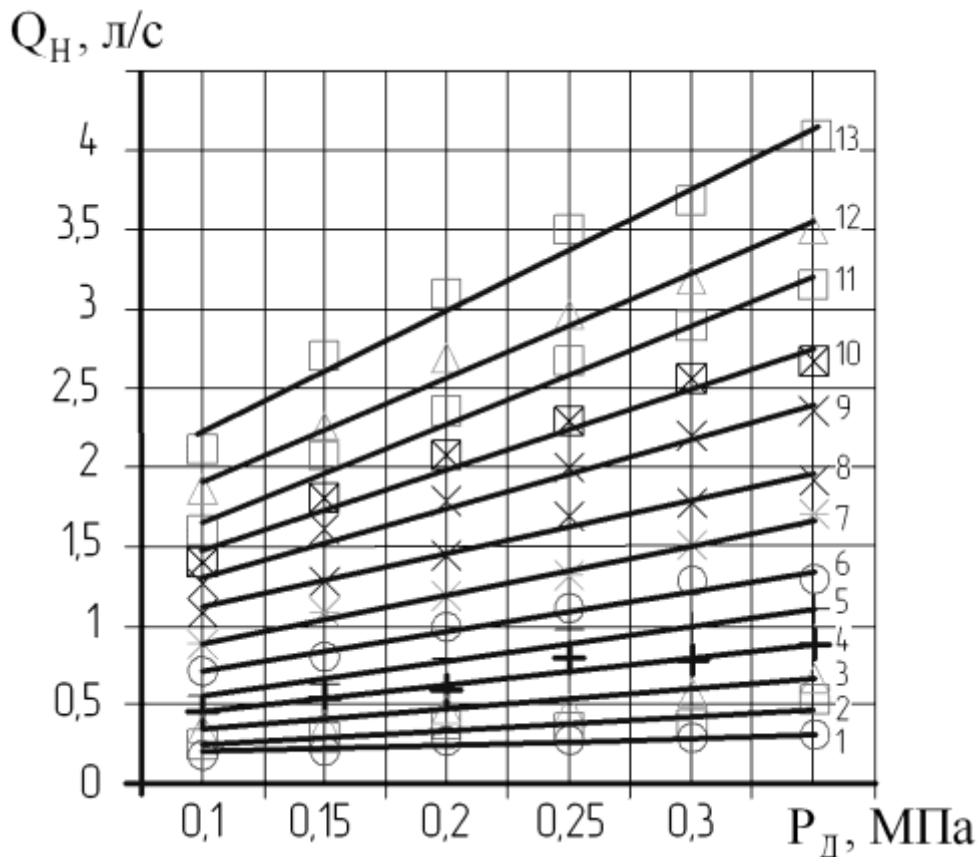


Рисунок 4.1 – Характеристика дождевателей «расход – давление» при различных диаметрах сопла:

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 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. 4.2-4.3).

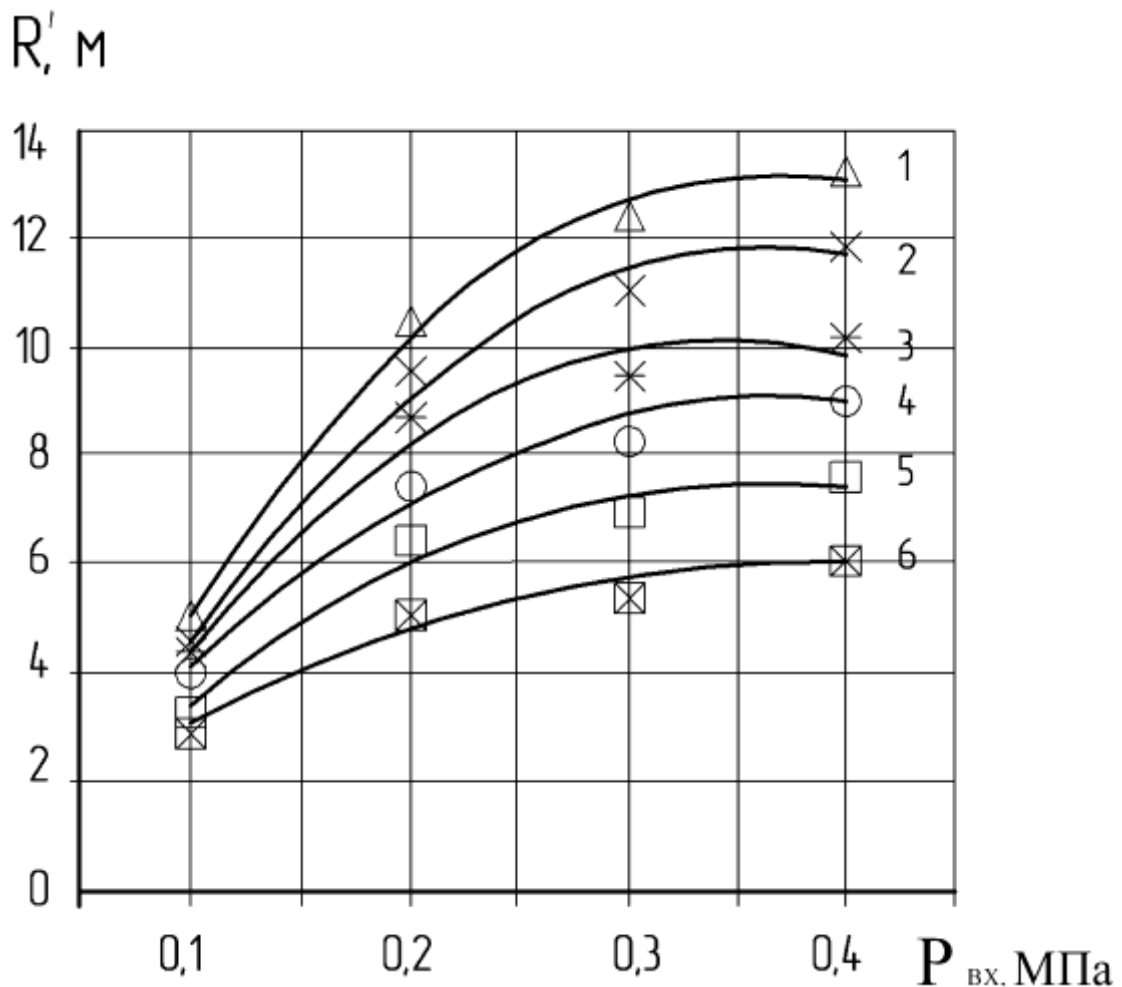


Рисунок 4.2 – Зависимость радиуса от напора для дождевателей для типа 1, исполнения 1:

1 – Ø8 мм, $R' = -120 P_{BX}^2 + 86,6 P_{BX} - 2,35$, $R^2 = 0,994$; 2 – Ø7 мм,
 $R' = -107 P_{BX}^2 + 77,45 P_{BX} - 2,125$, $R^2 = 0,987$; 3 – Ø6 мм,
 $R' = -97,5 P_{BX}^2 + 67,25 P_{BX} - 1,375$, $R^2 = 0,971$; 4 – Ø5 мм,
 $R' = -70 P_{BX}^2 + 51,2 P_{BX} - 0,3$, $R^2 = 0,981$; 5 – Ø4 мм,
 $R' = -65 P_{BX}^2 + 44,75 P_{BX} - 0,425$, $R^2 = 0,971$; 6 – Ø3 мм,
 $R' = -37,5 P_{BX}^2 + 28,45 P_{BX} + 0,625$,
 $R^2 = 0,966$. Высота установки 2,5 м.

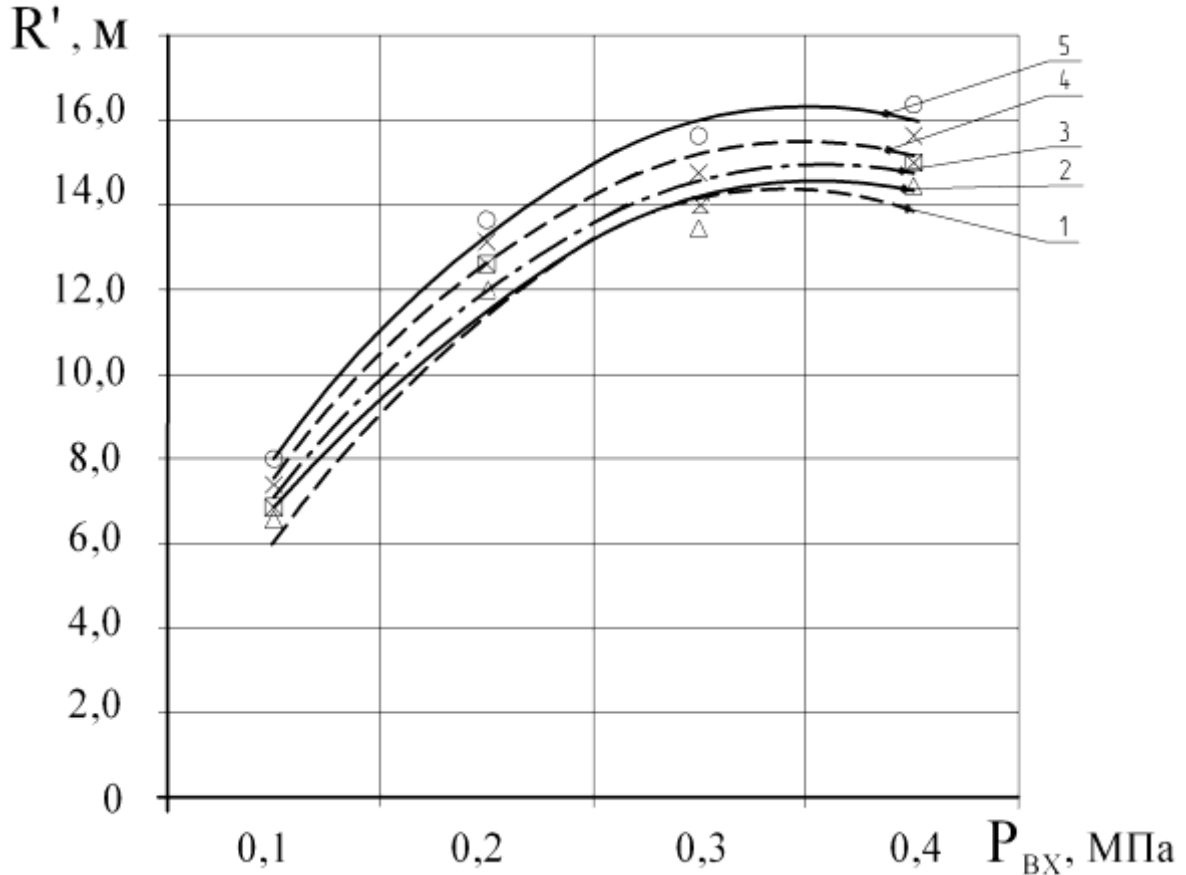


Рисунок 4.3 – Зависимость радиуса от давления для дождевателя тип 1, исполнение 1:

1 – Ø10мм, $R' = -142,5 P_{BX}^2 + 97,55 P_{BX} - 2,275$, $R^2 = 0,998$;
 2 – Ø11мм, $R' = -117,5 P_{BX}^2 + 84,25 P_{BX} - 0,525$, $R^2 = 0,991$;
 3 – Ø12мм, $R' = -115 P_{BX}^2 + 83,3 P_{BX} - 0,1$, $R^2 = 0,983$;
 4 – Ø13мм, $R' = -130 P_{BX}^2 + 90,6 P_{BX} - 0,25$, $R^2 = 0,993$;
 5 – Ø14мм, $R' = -127 P_{BX}^2 + 90,65 P_{BX} + 0,275$,
 $R^2 = 0,998$. Высота установки 2,5м.

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 наибольшими размерами канавок, т.е. 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 (см. рис. 4.4).

Однако даже визуально прослеживается увеличение диаметра капель дождя .

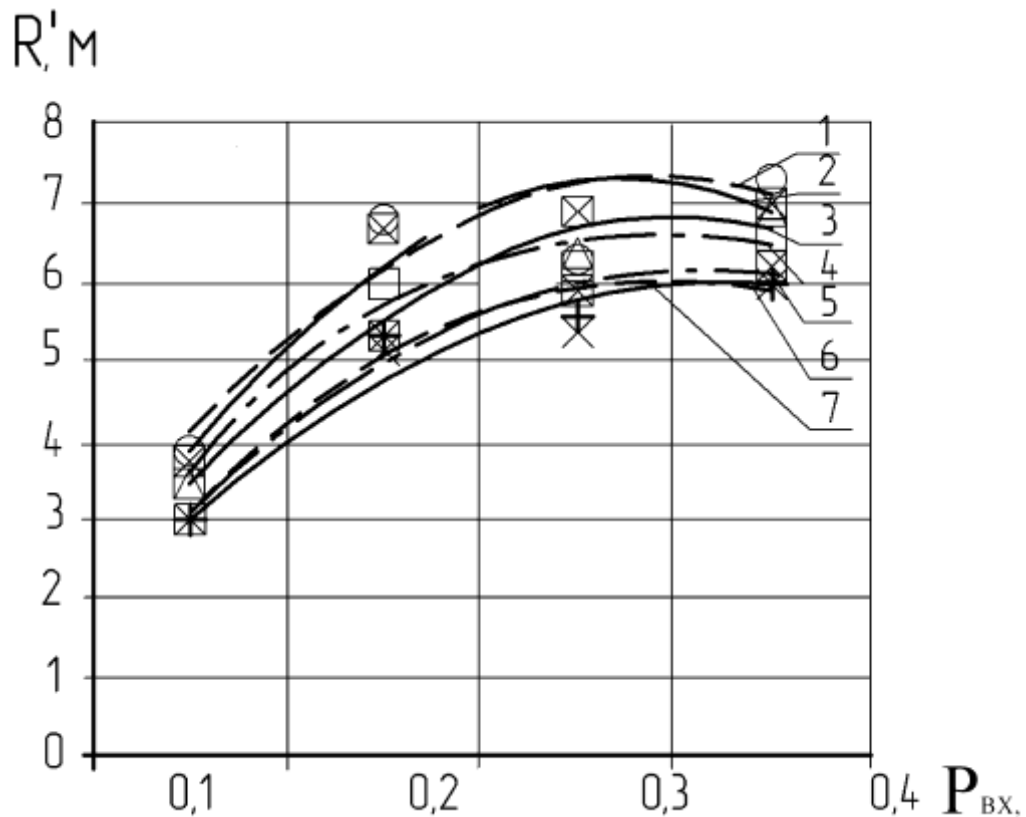


Рисунок 4.4 – Зависимость радиуса от давления для дождевателя с диаметром сопла $\varnothing 3$ мм и стационарным дефлектором на высоте 2,5 м:

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 3 мм, глубина 3 мм); 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.

Статические дефлекторы с мелкими канавками образуют плотные мелкие струи, устойчивые к ветру, обеспечивающие большую дальность и щадящие по отношению к почве и растениям.

Рассматривая работу дождевателей с вращающимся дефлектором (рис. 4.5) можно заметить более крутую характеристику, по сравнению с дождевателями, имеющими статический дефлектор. С увеличением давления радиус захвата дождем у дождевателей с вращающимся дефлектором увеличивается в большей степени.

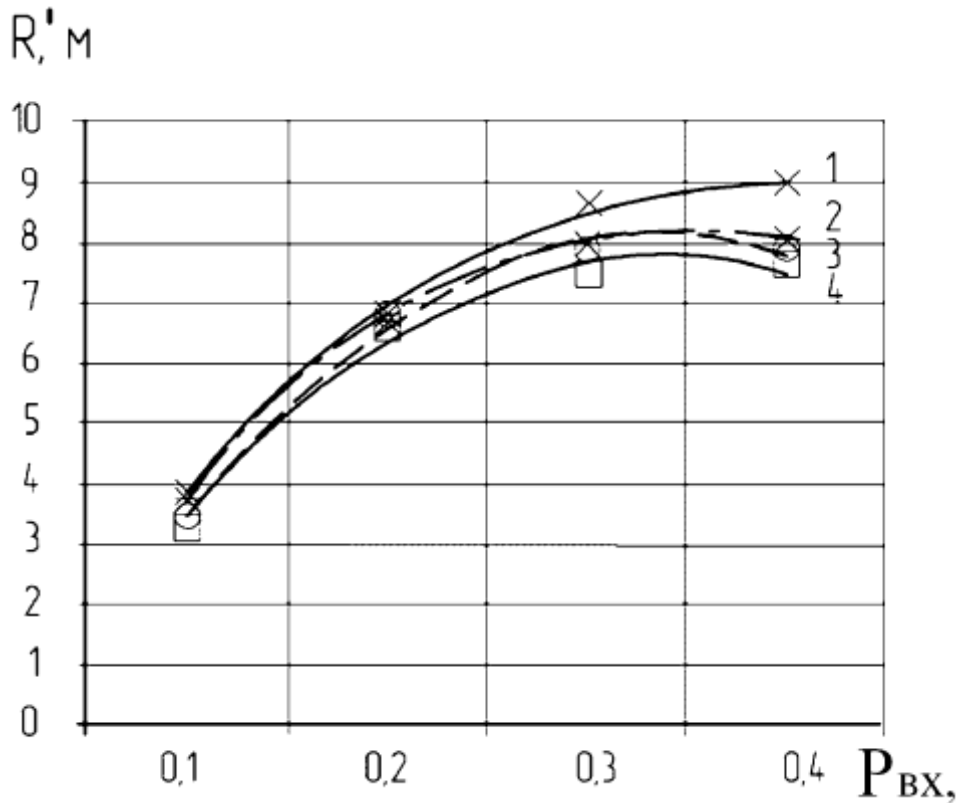


Рисунок 4.5 – Зависимость радиуса полива от давления для дождевателей с вращающимся дефлектором и диаметром сопла 3 мм:

1 – $R' = -90 P_{BX}^2 + 57 P_{BX} - 1,35$, $R^2 = 0,995$ (исполнение 5, ширина 1,5 мм, глубина 1,5 мм);

2 – $R' = -95 P_{BX}^2 + 60,3 P_{BX} - 1,55$, $R^2 = 0,998$ (исполнение 5, ширина 3 мм, глубина 3 мм);

3 – $R' = -77,5 P_{BX}^2 + 52,45 P_{BX} - 0,675$, $R^2 = 0,99$ (исполнение 4, ширина 3 мм, глубина 3 мм);

4 – $R' = -82,5 P_{BX}^2 + 55,95 P_{BX} - 0,925$, $R^2 = 0,99$ (исполнение 5, ширина 5 мм, глубина 5 мм).

Высота установки 2,5 м. P_{BX} в МПа.

Исследования показывают, что при малом давлении порядка 0,05-0,07 МПа дождеватели с вращающимся дефлектором обеспечивают меньший радиус

полива, чем гладкие стационарные, а повышение характеристик соответствует увеличению давления свыше 0,1 МПа (рис.4.6).

Рассмотрим работу каскадных дождевателей, исполнение 5 (рис.4.7).

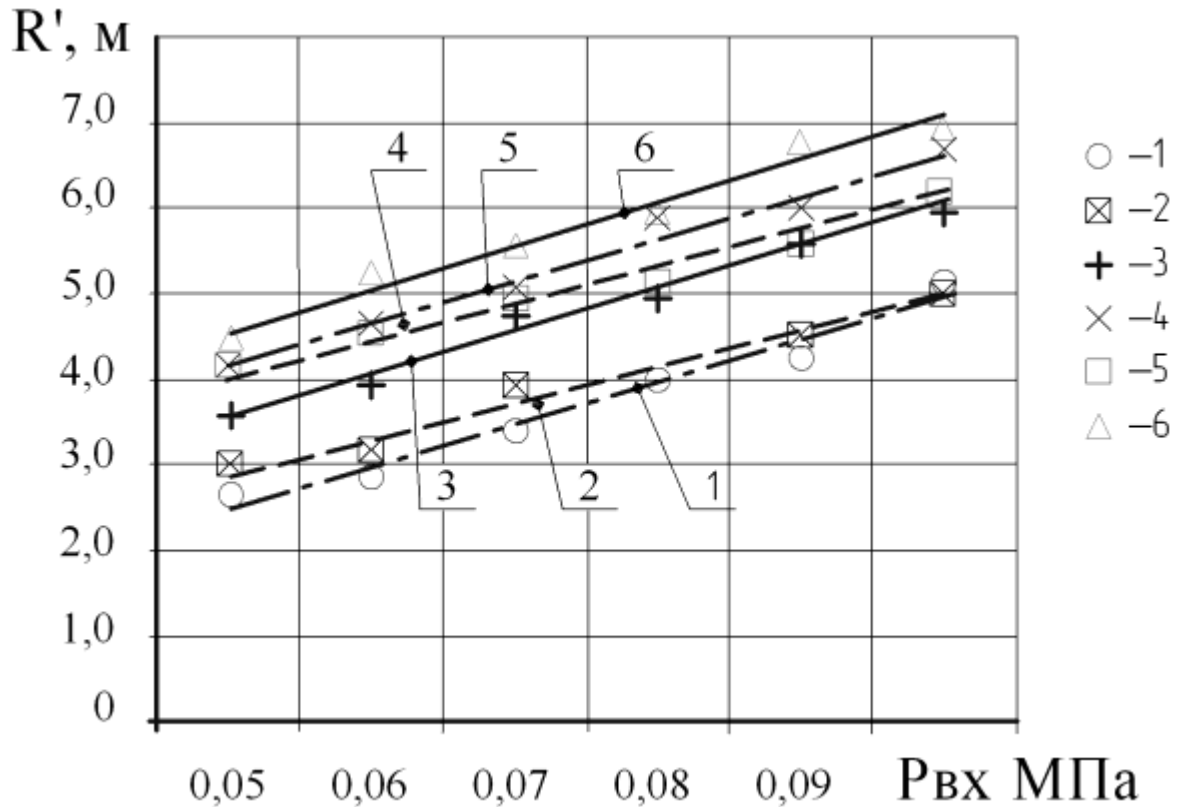


Рисунок 4.6 – Зависимость радиуса от давления для дождевателей:

- 1 – $R' = 47,71 P_{вх} + 0,138$, $R^2 = 0,960$ (исполнение 4, диаметр сопла $\varnothing 6$ мм);
- 2 – $R' = 40,85 P_{вх} + 0,819$, $R^2 = 0,984$ (исполнение 1, диаметр сопла $\varnothing 6$ мм);
- 3 – $R' = 48,85 P_{вх} + 1,152$, $R^2 = 0,992$ (исполнение 4, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм);
- 4 – $R' = 34,85 P_{вх} + 2,485$, $R^2 = 0,993$ (исполнение 1, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм);
- 5 – $R' = 48,28 P_{вх} + 1,761$, $R^2 = 0,988$ (исполнение 2, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм);
- 6 – $R' = 49,71 P_{вх} + 2,103$, $R^2 = 0,989$ (исполнение 1, диаметр сопла $\varnothing 14$ мм).

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 4.7 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.

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.

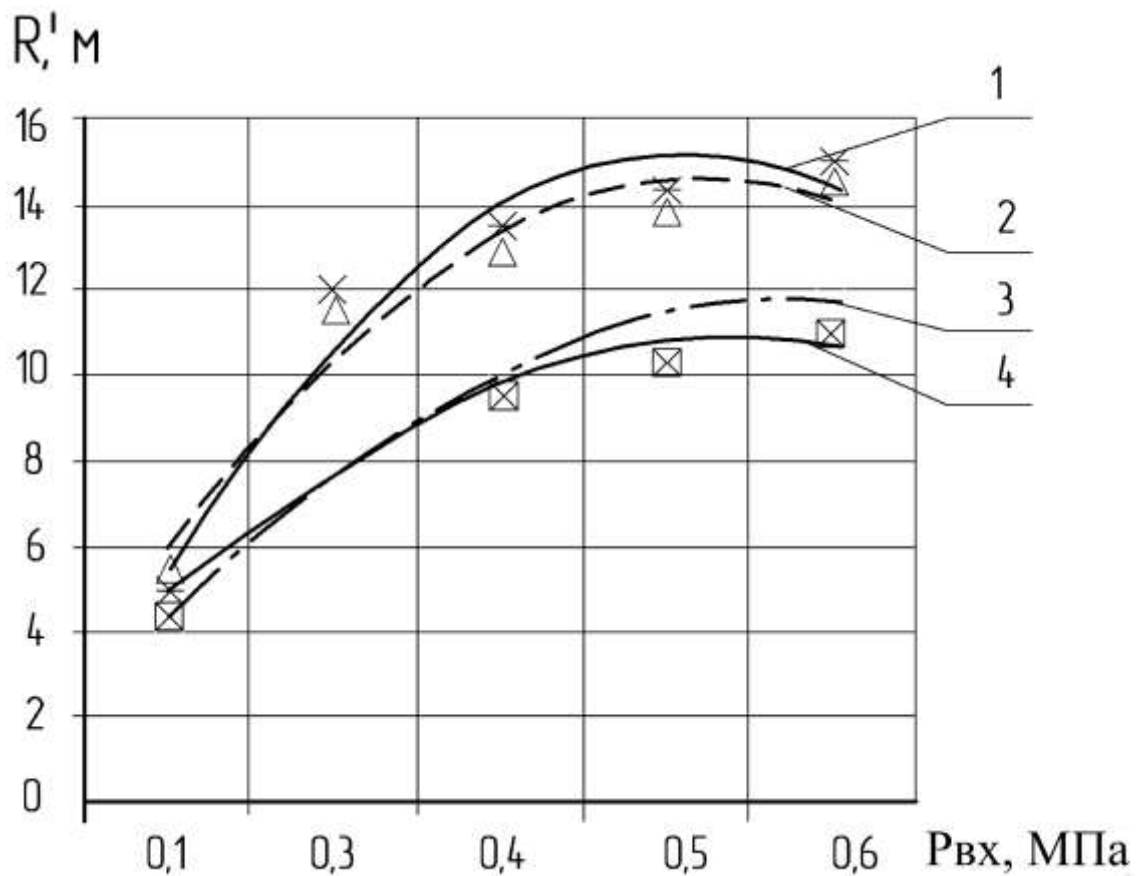


Рисунок 4.7 – Зависимость радиуса от давления для каскадных дождевателей:

1 – $R' = -131,2 P_{вх}^2 + 94,26 P_{вх} - 0,21$, $R^2 = 0,971$ (диаметр сопла $\varnothing 15$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 10$ мм); 2 – $R' = -32,5 P_{вх}^2 + 93,6 P_{вх} - 0,25$, $R^2 = 0,962$ (диаметр сопла $\varnothing 15$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 7$ мм); 3 – $R' = -117,5 P_{вх}^2 + 84,25 P_{вх} - 0,525$, $R^2 = 0,966$ (диаметр сопла $\varnothing 10$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 7$ мм); 4 – $R' = -142,5 P_{вх}^2 + 97,55 P_{вх} - 2,275$, $R^2 = 0,99$ (диаметр сопла $\varnothing 10$ мм, диаметр отверстия верхнего дефлектора $\varnothing 5$ мм).

При повышении давления или уменьшении диаметра сопла, улучшается не только распыл струи, но также может увеличиваться равномерность распределения осадков, что требует дополнительных исследований.

4.2 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 .

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. 4.8-4.9).

При больших расходах дождеватели, имеющие вращающиеся дефлекторы, обеспечивают меньшее значение интенсивности, нежели дождеватели со статическими дефлекторами (рис. 4.9). Дождеватели со статическими дефлекторами с большими канавками также имеют большую интенсивность по сравнению с дождевателями с гладкими дефлекторами.

При дальнейшем увеличении расхода (рис. 4.10) 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.

Интенсивность полива снижается при увеличении площади полива и разделении потока через дождеватель на большее количество струй.

Проведенные выше исследования различных типов дождевателей позволили определить способы повышения радиуса полива и повышения дальности при ветре.

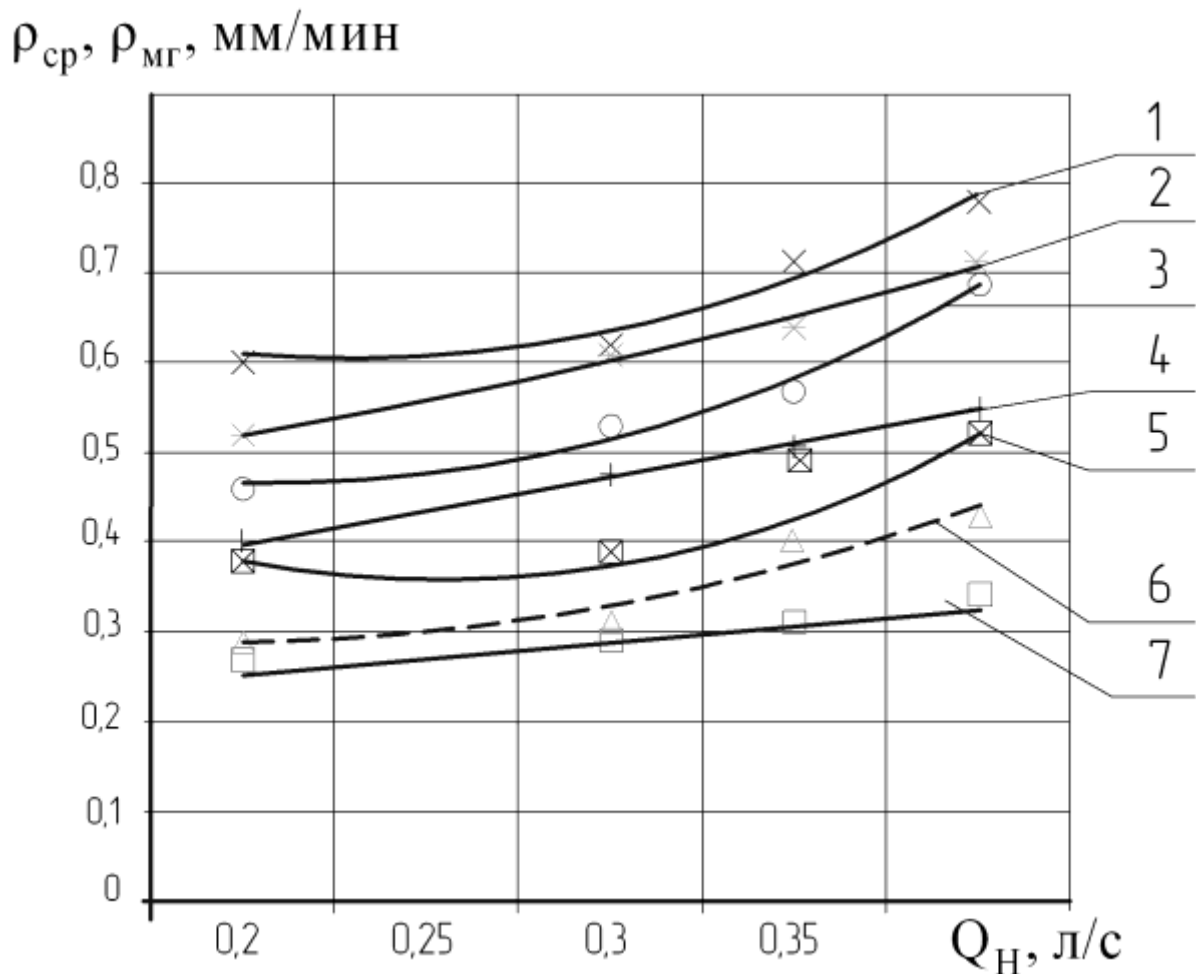


Рисунок 4.8 – Средняя ($\rho_{ср}$) и мгновенная ($\rho_{мг}$) интенсивность дождя при поливе дождевателями в зависимости от расхода дождевателя, диаметр сопла $\varnothing 3$ мм: 1 – $\rho_{ср} = 6,454Q_{н}^2 - 2,980 Q_{н} + 0,945$, $R^2 = 0,975$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм);

2 – $\rho_{мг} = 0,914 Q_{н} + 0,334$, $R^2 = 0,983$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм);

3 – $\rho_{ср} = 5,545 Q_{н}^2 - 2,219 Q_{н} + 0,684$, $R^2 = 0,982$ (исполнение 4 и 5, канавки 1,5-2 мм);

4 – $\rho_{мг} = 0,742 Q_{н} + 0,252$, $R^2 = 0,997$ (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)

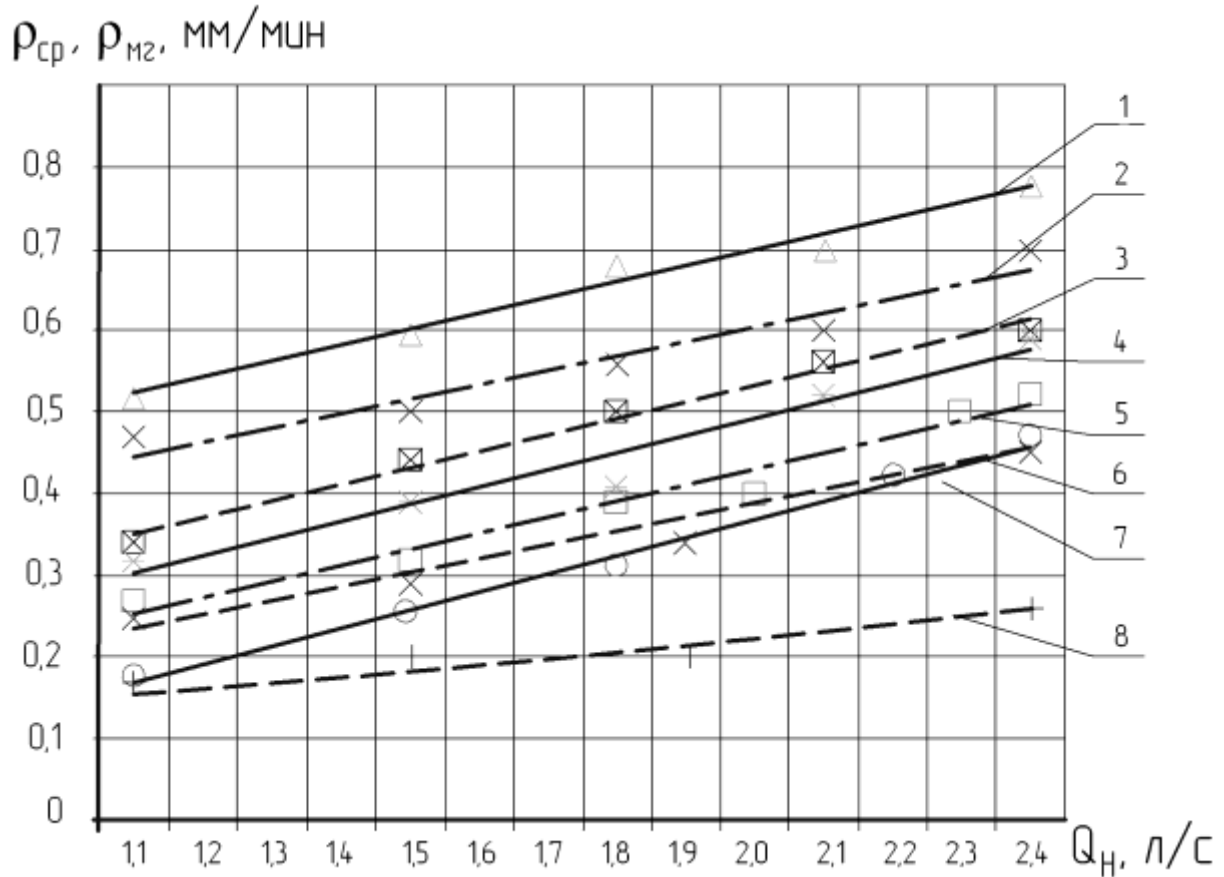


Рисунок 4.9 – Зависимость средней ($\rho_{\text{ср}}$) и мгновенной ($\rho_{\text{мг}}$) интенсивности дождя от расхода при поливе дождевателями с диаметром сопла $\text{Ø}10$ мм:

- 1 – $\rho_{\text{ср}} = 0,194 Q_{\text{Н}} + 0,310$, $R^2 = 0,980$ (исполнение 2 и 3, канавки 3 мм);
 2 – $\rho_{\text{ср}} = 0,172 Q_{\text{Н}} + 0,258$, $R^2 = 0,937$ (исполнение 1);
 3 – $\rho_{\text{ср}} = 0,201 Q_{\text{Н}} + 0,129$, $R^2 = 0,988$ (исполнение 4 и 5 канавки 5-6 мм);
 4 – $\rho_{\text{МГ}} = 0,207 Q_{\text{Н}} + 0,076$, $R^2 = 0,954$ (исполнение 2 и 3, канавки 3 мм);
 5 – $\rho_{\text{МГ}} = 0,195 Q_{\text{Н}} + 0,039$, $R^2 = 0,967$ (исполнение 1);
 6 – $\rho_{\text{МГ}} = 0,152 Q_{\text{Н}} + 0,068$, $R^2 = 0,963$ (исполнение 4 и 5, канавки 5 – 6 мм);
 7 – $\rho_{\text{ср}} = 0,238 Q_{\text{Н}} - 0,118$, $R^2 = 0,829$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм);
 8 – $\rho_{\text{МГ}} = 0,060 Q_{\text{Н}} + 0,109$, $R^2 = 0,983$ (исполнение 4 и 5, канавки 3 мм)

При дефлекторе с канавками с кромок отражателя срываются многочисленные струйки в виде нитей, толщина которых уменьшается с увеличением скорости течения. Нити распадаются на капли.

Распределение нормированного слоя дождя (h_i/h_{cp}) вдоль радиуса захвата дождевателем в зависимости от диаметра сопла и давления показаны на рис. 4.11- 4.12.

ρ_{cp} , мм/мин

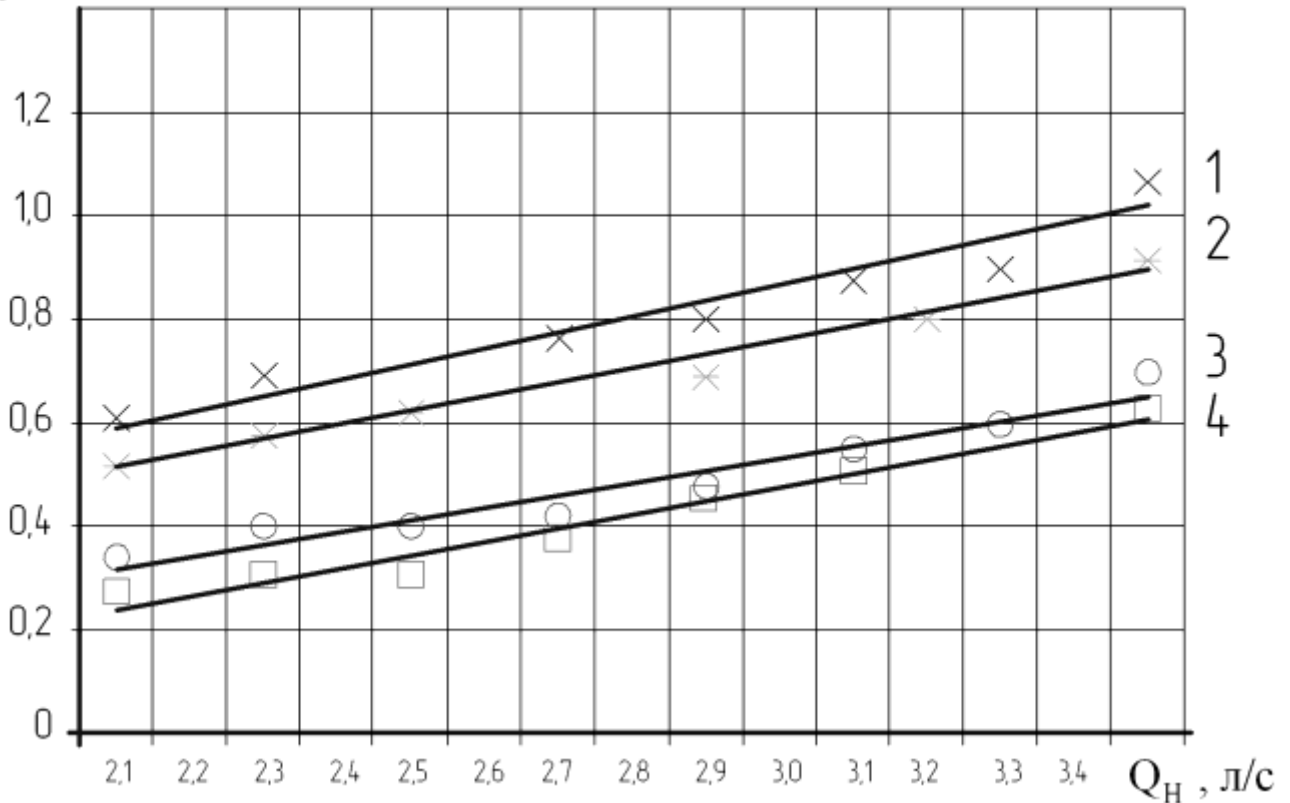


Рисунок 4.10 – Средняя (ρ_{cp}) интенсивность дождя при поливе дождевателями в зависимости от расхода диаметр сопла 15 мм:

- 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)

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.

Для дождевателей с гладким статическим дефлектором

При небольшом давлении $P_{вх}=0,05...0,10$ МПа основная масса дождя выпадает в конце радиуса захвата дождевателем, выпадая большими каплями.

При увеличении давления до $P_{ВХ} = 0,1 \dots 0,50$ МПа струя распадается на мелкие капли и более равномерно распределяется вдоль радиуса захвата дождем.



Рисунок 4.11 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса полива при диаметре сопла $\varnothing 3$ мм, исполнение 1:

- 1 – $P_{ВХ} = 0,08$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,010R'^3 - 0,111R'^2 + 0,919R' - 0,272$; $R^2 = 0,971$;
 2 – $P_{ВХ} = 0,14$ МПа; $h_i/h_{cp} = 0,044R'^3 - 0,593R'^2 + 2,197R' - 1,07$; $R^2 = 0,851$;
 3 – $P_{ВХ} = 0,32$ МПа; $h_i/h_{cp} = -0,141R'^2 - 0,756R' + 0,56$; $R^2 = 0,972$

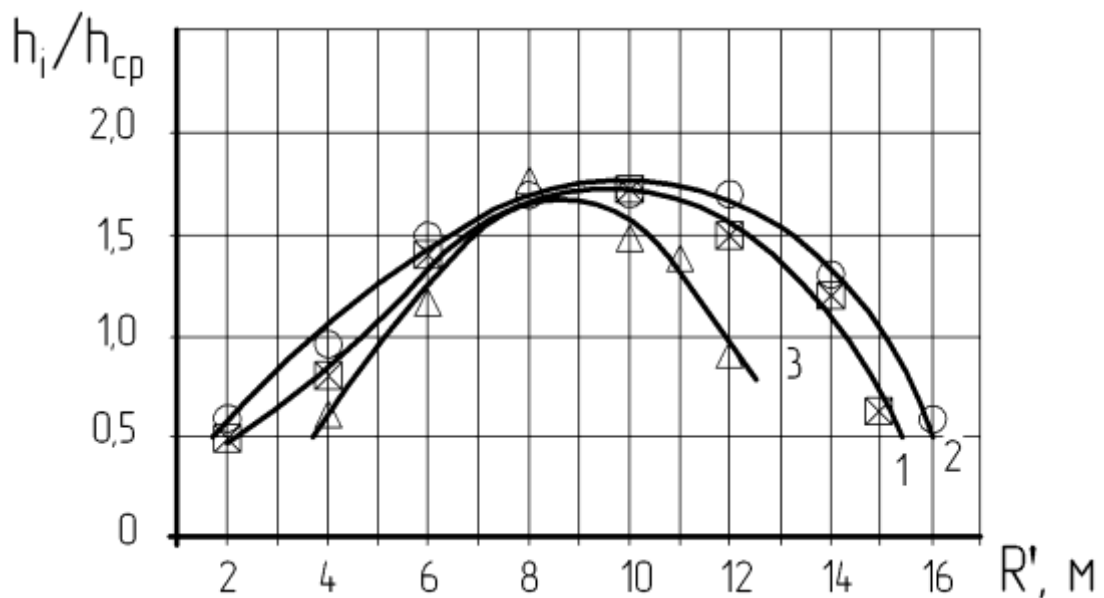


Рисунок 4.12 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса полива при диаметре сопла $\varnothing 10$ мм, исполнение 1:

1 – $P_{ВХ}=0,12$ МПа; $h_i/h_{ср} = -0,156R'^2 + 0,948R' - 0,115$, $R^2=0,885$;

2 – $P_{ВХ}=0,23$ МПа; $h_i/h_{ср} = -0,04R'^3 - 0,574R'^2 + 2,177R' - 1,066$, $R^2=0,881$;

3 – $P_{ВХ}=0,08$ МПа; $h_i/h_{ср} = -0,010R'^3 - 0,153R'^2 + 1,176R - 0,512$, $R^2=0,99$

Для дождевателей со статическим дефлектором с канавками

При небольшом давлении $P_{ВХ} = 0,05 \dots 0,10$ МПа струя также в большей степени выпадает в конце радиуса захвата дождем (рис. 4.13). При увеличении давления $P_{ВХ} = 0,1 \dots 0,50$ МПа струя равномерно распределяется вдоль радиуса захвата дождем.

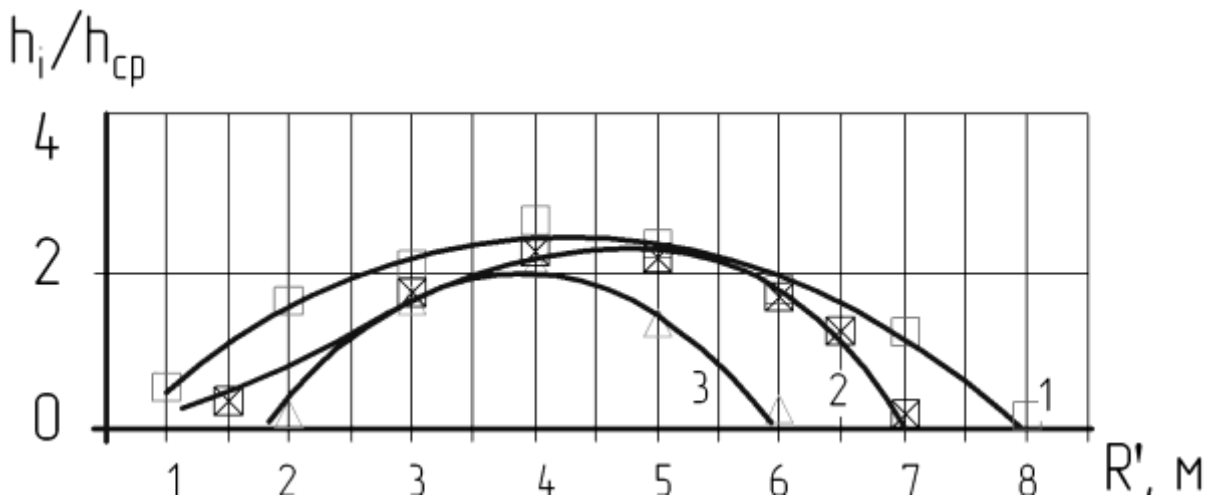


Рисунок 4.13 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса полива при диаметре сопла $\varnothing 5$ мм, исполнение 2 и 3:

1 – $P_{ВХ}=0,18$ МПа; $h_i/h_{ср} = -0,173R'^2 + 1,495R' - 0,821$, $R^2=0,963$;

2 – $P_{ВХ} = 0,12$ МПа; $h_i/h_{ср} = -0,225R'^2 + 1,847R' - 1,504$, $R^2=0,911$;

3 – $P_{ВХ}=0,06$ МПа; $h_i/h_{ср} = -0,304R'^2 + 2,169R' - 1,79$, $R^2=0,92$

Для дождевателей с вращающимся дефлектором и канавками

При давлении $P_{ВХ} = 0,05 \dots 0,5$ МПа струя лучше распадается на капли и равномерно распределяется вдоль радиуса, чем со статическим дефлектором.

При давлении $P_{ВХ} = 0,05 \dots 0,1$ МПа зона равномерности находится ближе к началу радиуса, при увеличении давления происходит смещение к концу и выравнивание по всему радиусу (рис. 4.14).

Для каскадных дождевателей

При давлении $P_{ВХ}=0,05...0,5$ МПа обеспечивается высокая равномерность распределения дождя. Формами и размерами дефлектора и формой канавок подбирается характеристики распределения дождя вдоль радиуса полива.

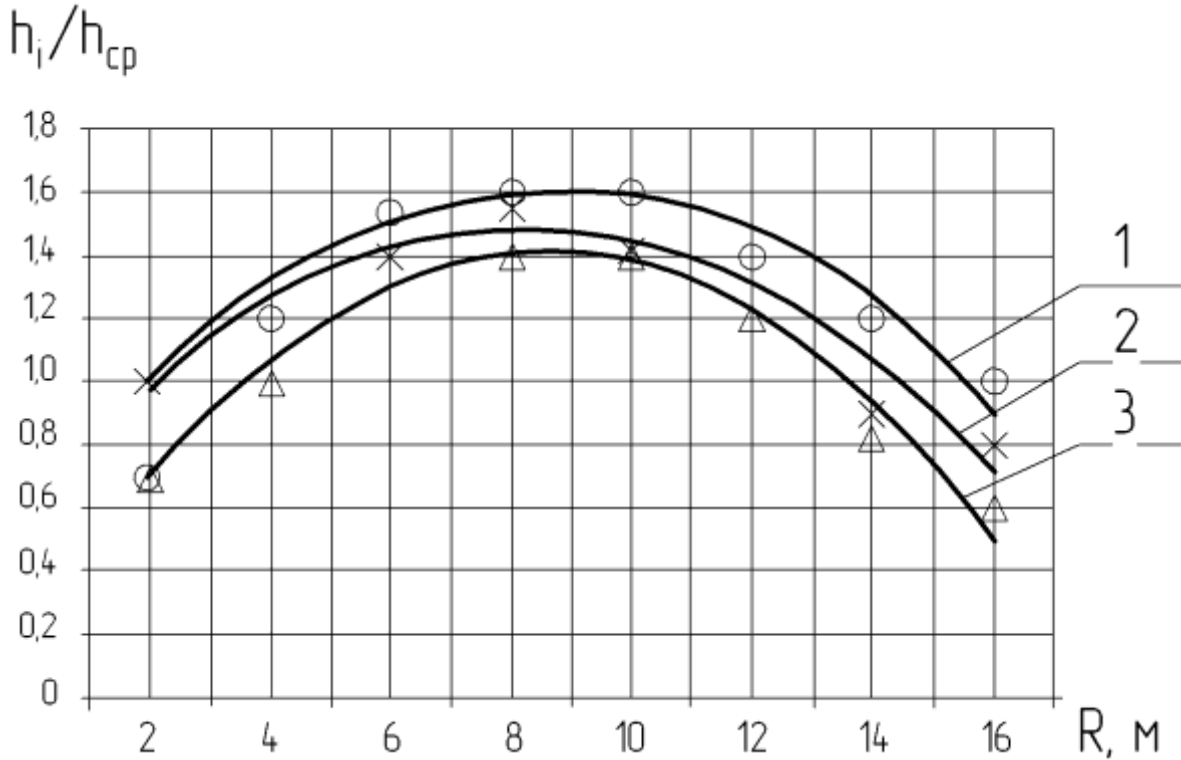


Рисунок 4.14 – Распределение слоя дождя вдоль радиуса при диаметре сопла 12 мм и давлении 0,22 МПа:

- 1 – $h_i/h_{ср} = -0,015R^2 + 0,291R' + 0,25$, $R^2=0,948$ (исполнение 5, канавки 6 мм);
- 2 – $h_i/h_{ср} = -0,012R^2 + 0,209R' + 0,611$, $R^2=0,904$ (исполнение 4, канавки 5мм);
- 3 – каскадного $h_i/h_{ср} = -0,016R^2 + 0,280R' + 0,213$, $R^2=0,941$ (исполнение 6)

4.3 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.

Средний диаметр капель дождевателей со стационарным гладким дефлектором и с канавками увеличивается с увеличением диаметра сопла и с уменьшением давления перед дождевателем (рис.4.15, 4.16).

Для дождевателей, имеющих дефлектор с канавками зависимость более пологая, диаметр капель меняется в меньшей степени и в среднем на 15-20% меньше (рис. 4.17).

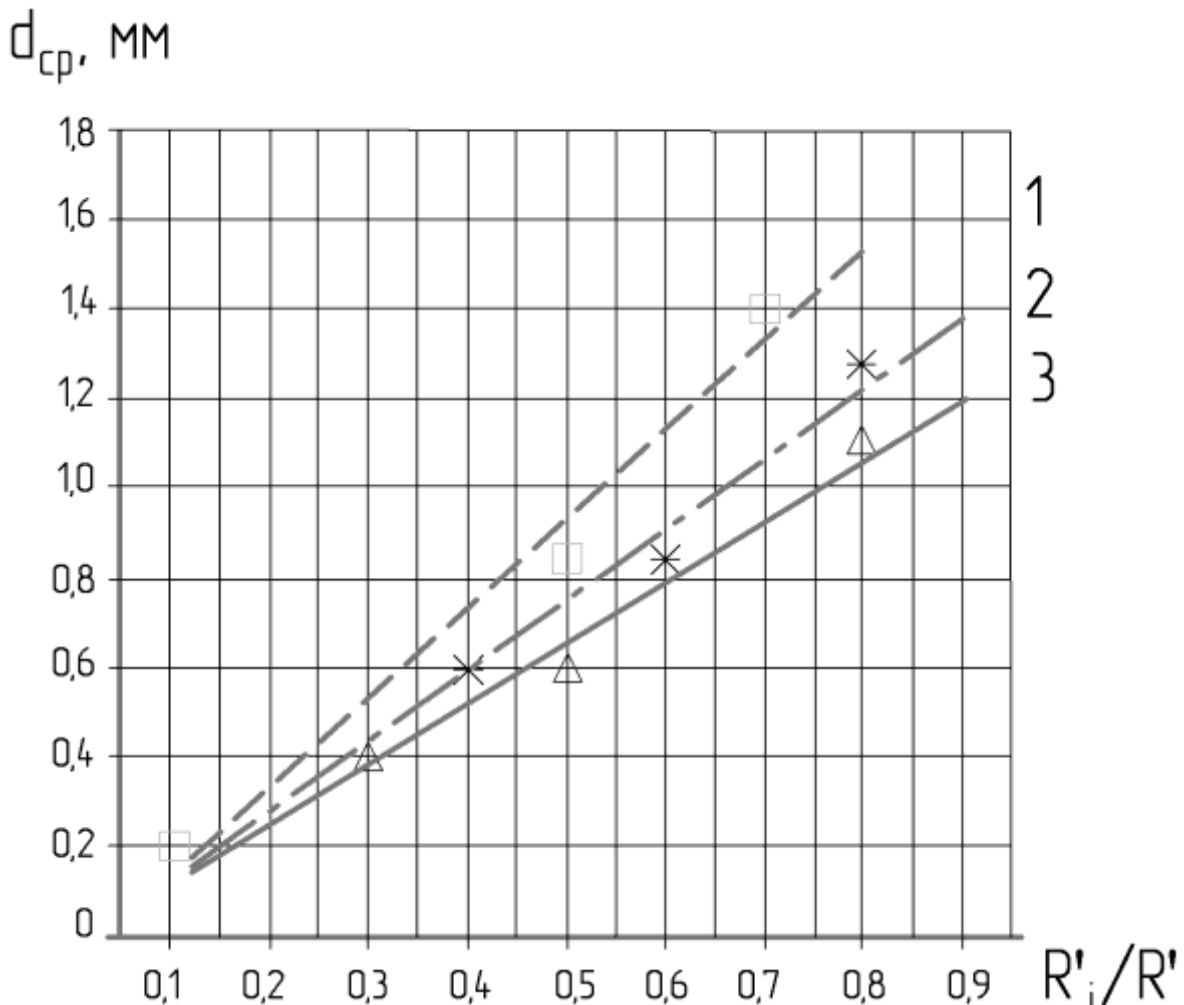


Рисунок 4.15 – Изменение среднего диаметра капель с увеличением относительного радиуса полета капель R'_i/R' при диаметре сопла $\varnothing 6$ мм:

1 – $P_{ВХ} = 0,08$ МПа, $d_{ср} = 2,0R'_i/R' - 0,06$, $R^2 = 0,957$;

2 – $P_{ВХ} = 0,14$ МПа, $d_{ср} = 1,621R'_i/R' - 0,034$, $R^2 = 0,969$;

3 – $P_{ВХ} = 0,3$ МПа, $d_{ср} = 1,453R'_i/R' - 0,032$, $R^2 = 0,978$.

Исследования показывают, что диаметр капель в конце радиуса выравнивается для всех типов дождевателей и не превышает 1,6 мм даже при низких давлениях до 0,1 МПа.

Рассматривая работу дождевателей каскадного исполнения 6 можно заметить, что они обеспечивают диаметр капель в пределах нормы при низких давлениях и максимальных диаметрах сопла 15 мм (рис.4.18).

При помощи дождевателей с каскадными дефлекторами можно обеспечивать достаточно мягкий режим орошения при больших расходах.

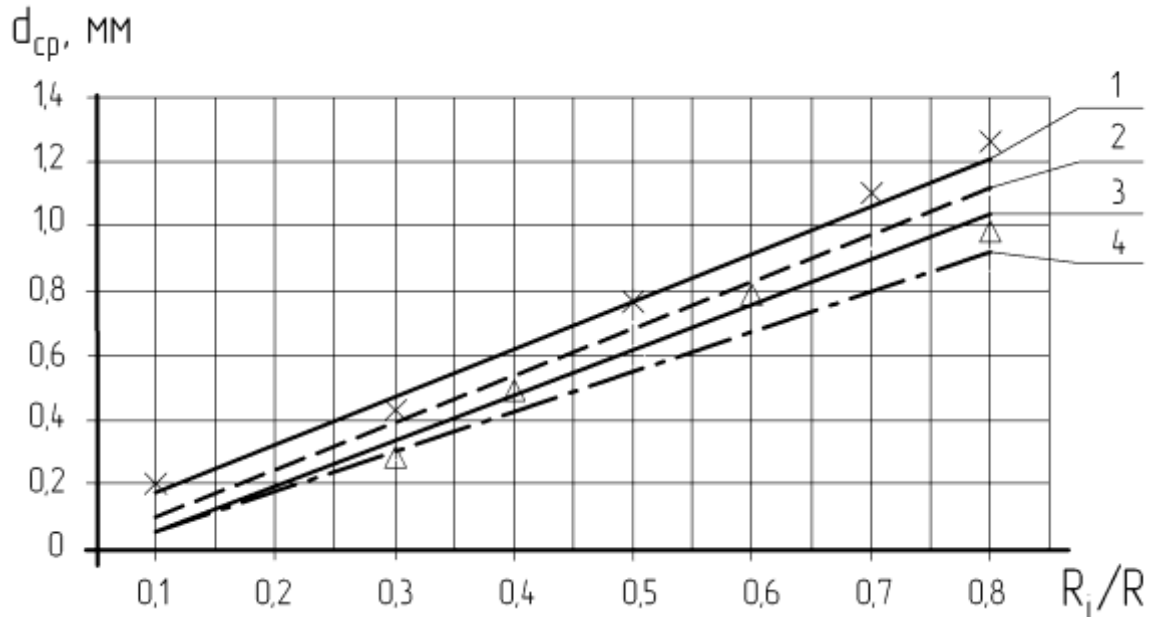


Рисунок 4.16 – Изменение среднего диаметра капель с увеличением относительного радиуса полета капель R_i/R :

1 – $d_{ср} = 1,464 R_i/R + 0,032$, $R^2 = 0,984$ (исполнение 2, $P_{вх} = 0,16$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм);
 2 – $d_{ср} = 1,432 R_i/R - 0,035$, $R^2 = 0,998$ (исполнение 3, $P_{вх} = 0,16$ МПа, диаметр сопла 8 мм);
 3 – $d_{ср} = 1,389 R_i/R - 0,079$, $R^2 = 0,982$ (исполнение 2, $P_{вх} = 0,18$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм);
 4 – $d_{ср} = 1,147 R_i/R - 0,005$, $R^2 = 0,991$ (исполнение 3, $P_{вх} = 0,2$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 10$ мм)

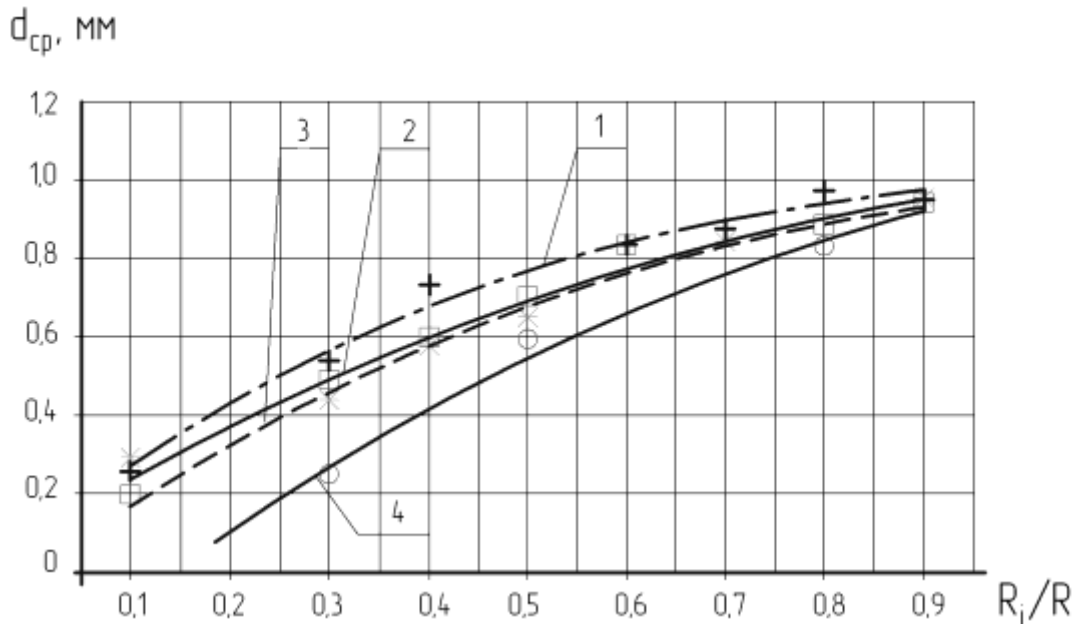


Рисунок 4.17 – Изменение среднего диаметра капель дождевателя с вращающимся дефлектором с изменением относительного радиуса полета капель R'_i/R' :

1 – $d_{cp} = -1,383(R'_i/R')^2 + 2,27(R'_i/R') - 0,01$, $R^2 = 0,910$ (исполнение 4, канавки 2 мм, $P_{вх} = 0,28$ МПа); 2 – $d_{cp} = -0,619(R'_i/R')^2 + 1,519 R'_i/R' + 0,088$, $R^2 = 0,905$ (исполнение 4; канавки 2 мм, $P_{вх} = 0,18$ МПа); 3 – $d_{cp} = -0,918(R'_i/R')^2 + 1,868 R'_i/R' - 0,008$, $R^2 = 0,979$ (исполнение 5; канавки 5 мм, $P_{вх} = 0,2$ МПа); 4 – $d_{cp} = -0,8(R'_i/R')^2 + 2,04R'_i/R' - 0,22$, $R^2 = 0,99$ (исполнение 5; канавки 5 мм, $P_{вх} = 0,35$ МПа)

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.

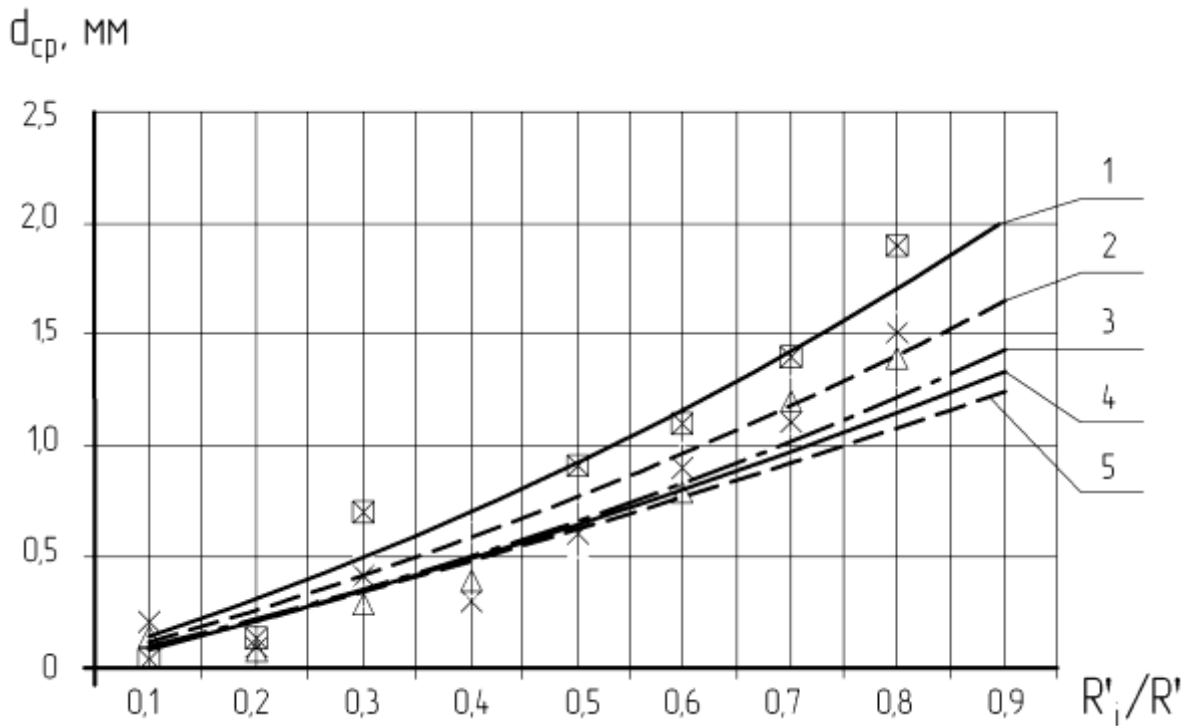


Рисунок 4.18 – Изменение среднего диаметра капель каскадного дефлектора с увеличением относительного радиуса полета капель R'_i/R' , исполнение б:

- 1 – $d_{CP} = 2,257 R'_i/R'^{1,320}$, $R^2 = 0,940$; $P_{BX} = 0,18$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 15$ мм;
 2 – $d_{CP} = 1,882 R'_i/R'^{1,303}$; $R^2 = 0,953$; $P_{BX} = 0,09$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 13$ мм;
 3 – $d_{CP} = 1,608 R'_i/R'^{1,279}$; $R^2 = 0,968$, $P_{BX} = 0,3$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 15$ мм;
 4 – $d_{CP} = 1,505 R'_i/R'^{1,247}$; $R^2 = 0,846$; $P_{BX} = 0,18$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 13$ мм;
 5 – $d_{CP} = 0,391 R'_i/R'^{1,124}$; $R^2 = 0,742$; $P_{BX} = 0,22$ МПа, диаметр сопла $\varnothing 13$ мм.

Для оценки коэффициента равномерности полива закономерность распределения интенсивности дождя вдоль радиуса рассмотрели с позиции основных фракций дождя по диаметру капель. Для определения закономерности были обработаны и обобщены результаты опытов, определяющих интенсивность, радиус был разбит на зоны, в которых основными (более 75%) являются капли определенной крупности, т.е. фракции менее 0,5мм; 0,6-0,8; 0,9-1,2 мм и более 1,2мм.

Рассмотрим распределения нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива без ветра и при ветре для дождевателей с гладким дефлектором. Из рисунка 4.19 -4.20 видно, что при работе дождевателя с гладким дефлектором основной фракцией полива являются капли с диаметром 0,9-1,2 мм при давлении 0,2-0,3 МПа.

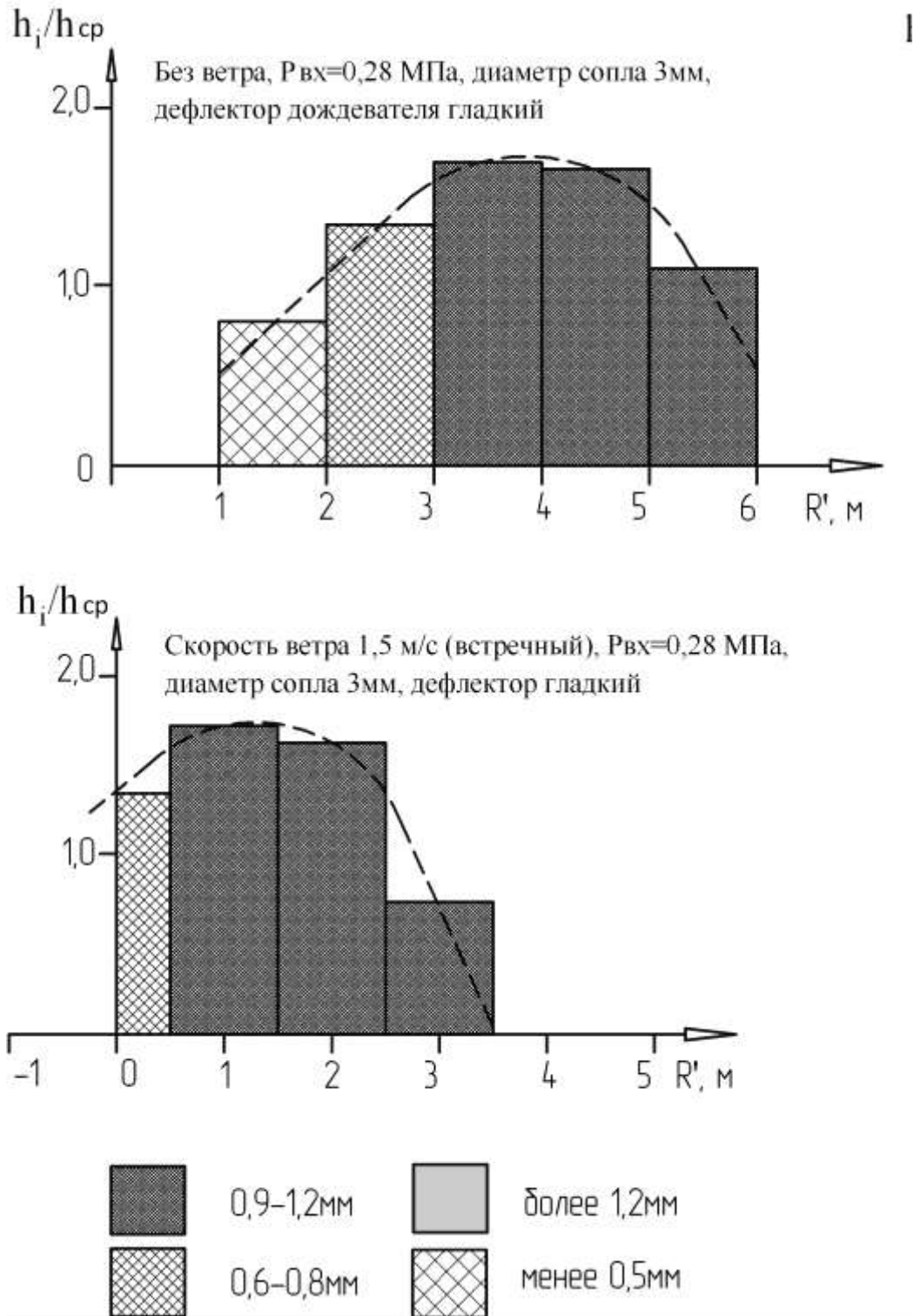


Рисунок 4.19 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива без ветра и при ветре для дождевателей (исполнение 1)

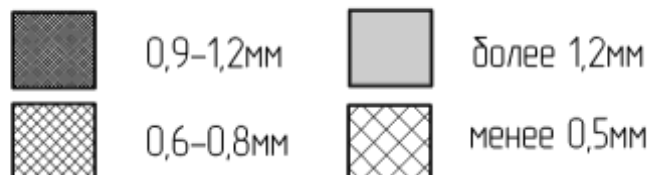
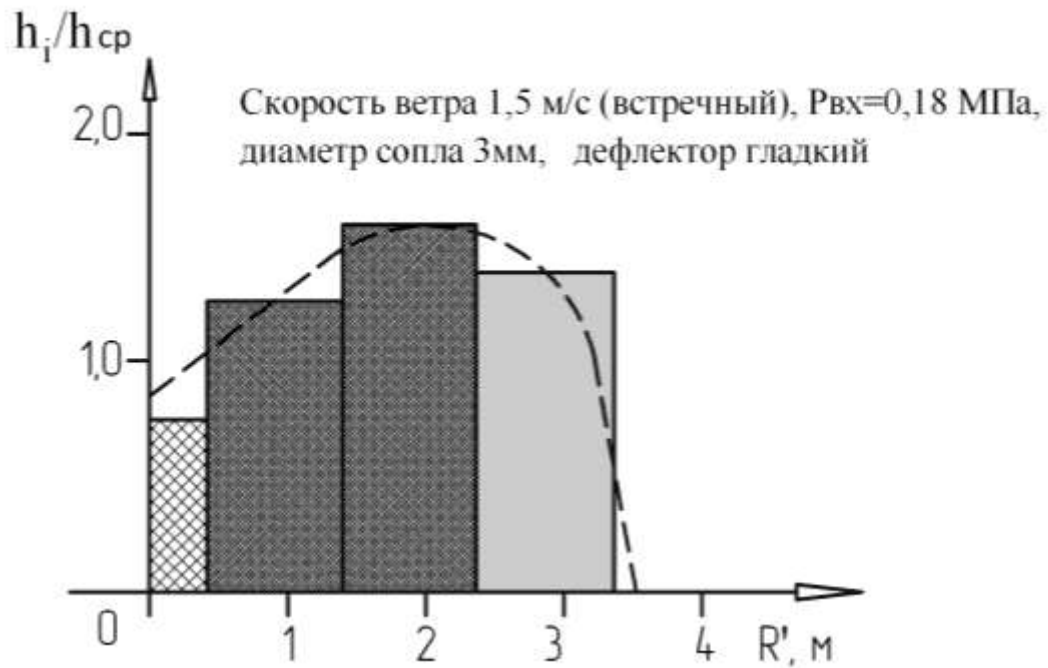
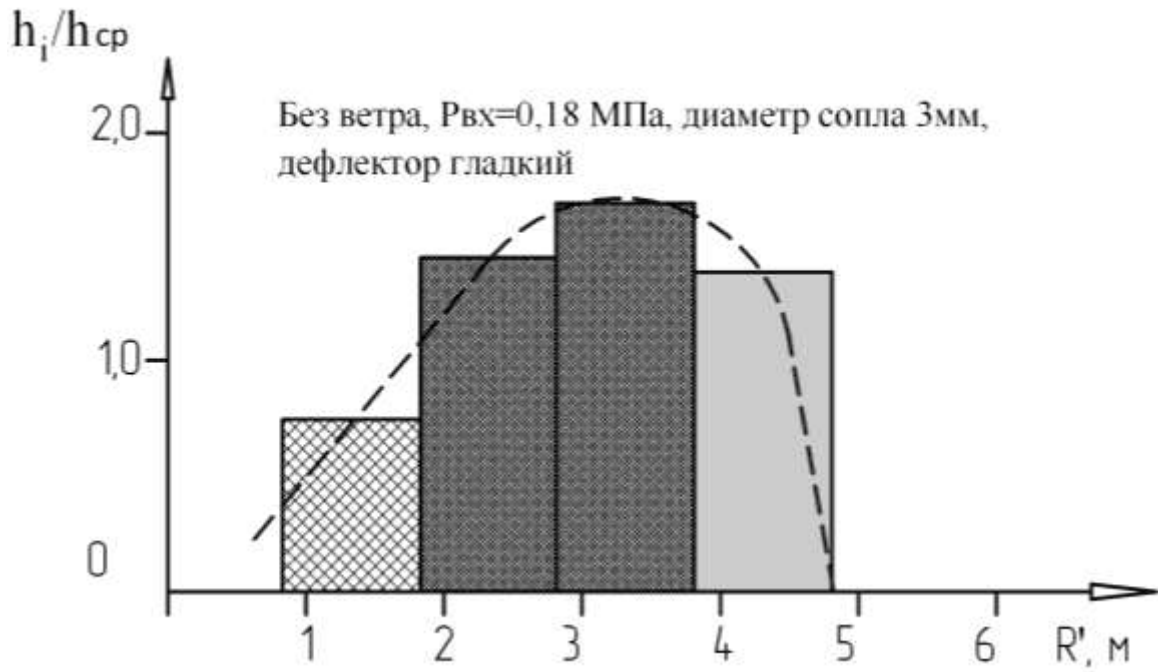


Рисунок 4.20 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива без ветра и при ветре для дождевателей (исполнение 1).

При снижении давления фракция менее 0,5 мм практически отсутствует как основная. В конце радиуса полива основной является фракция с размерами капель более 1,2 мм, более устойчивая к ветру. Однако наличие большого количества капель более 1,5 мм увеличивает воздействие на почву и растения. При увеличении ветра фракция с диаметром менее 0,5 мм практически полностью уносится в другой сектор полива .

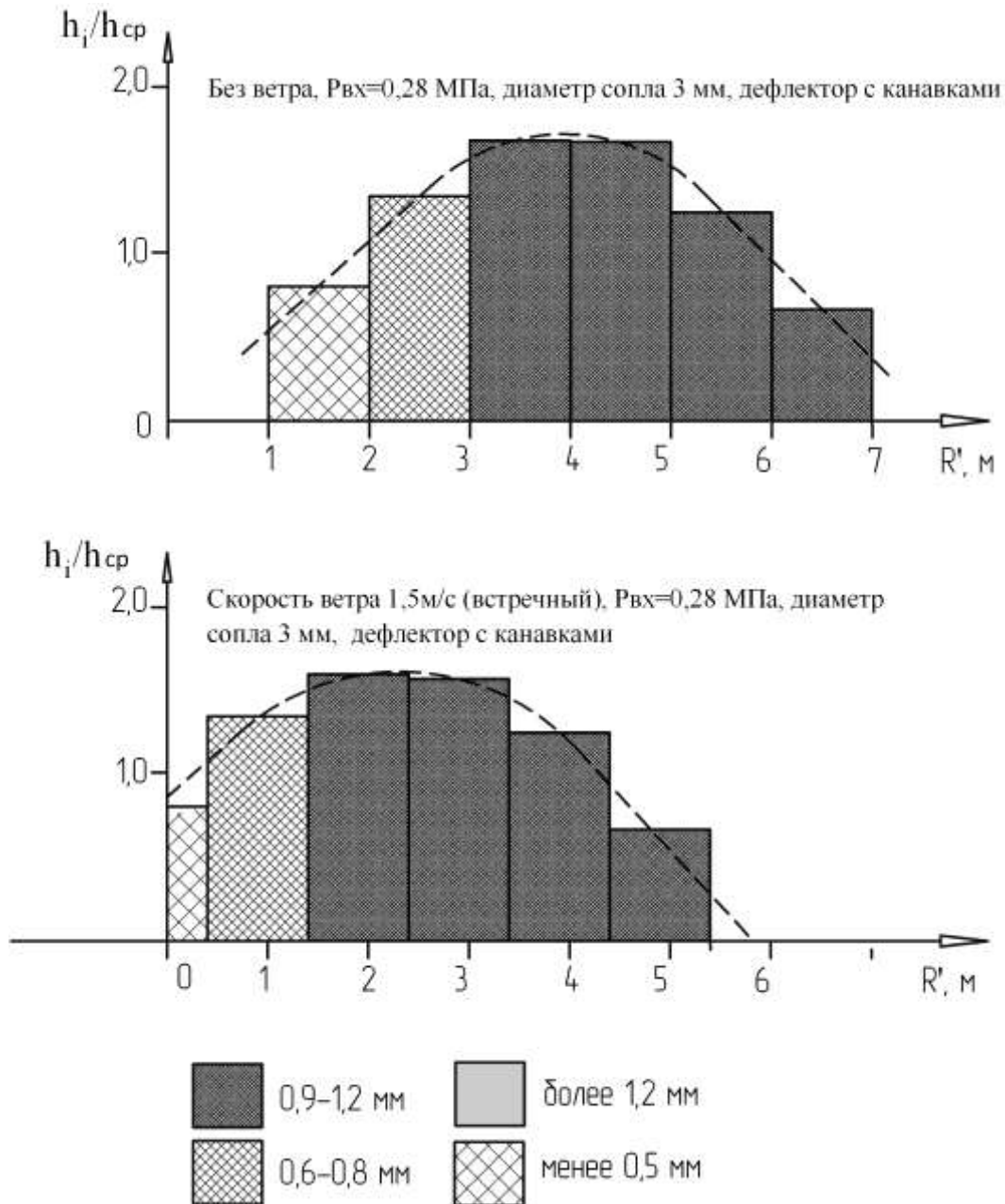


Рисунок 4.21 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива без ветра и при ветре для дождевателей (исполнение 2)

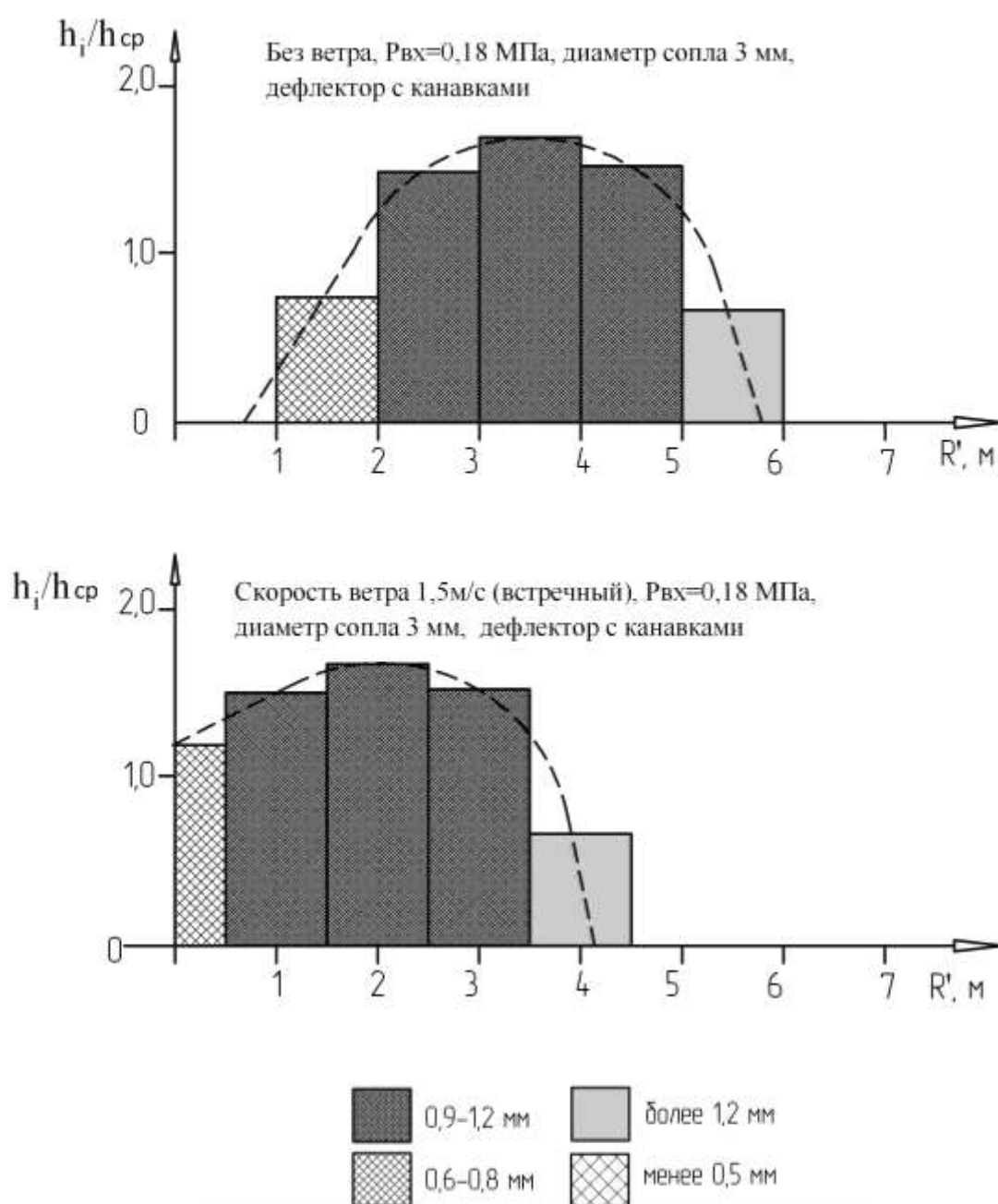


Рисунок 4.22 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива без ветра и при ветре для дождевателей (исполнение 2)

Для дождевателей с дефлектором с канавками радиус полива увеличивается по сравнению с дождевателями с гладким дефлектором, основной фракцией также является 0,9-1,2 мм, занимая практически 2/3 всего радиуса захвата дождем (рис. 4.21-4.22). Сформированные дефлектором плотные струйки способствуют увеличению ветроустойчивости. Фракция

размером более 1,2 мм незначительна и при напоре более 0,2 МПа практически отсутствует. Наилучшие результаты имеют дефлекторы с большим количеством малых канавок. При увеличении размера канавок ветроустойчивость увеличивается, однако происходит увеличение диаметра капель.

Дождеватели с вращающимся дефлектором (исполнение 3, 4) имеют больший радиус полива. При этом фракция 0,6-0,8 мм и менее 0,5 мм увеличивается с увеличением давления. В конце радиуса присутствует небольшая фракция более 1,2 мм, и при увеличении давления ее доля по сравнению с другими фракциями уменьшается. При малом давлении менее 0,08 МПа ее доля соответственно увеличивается (рис. 4.23-4.24).

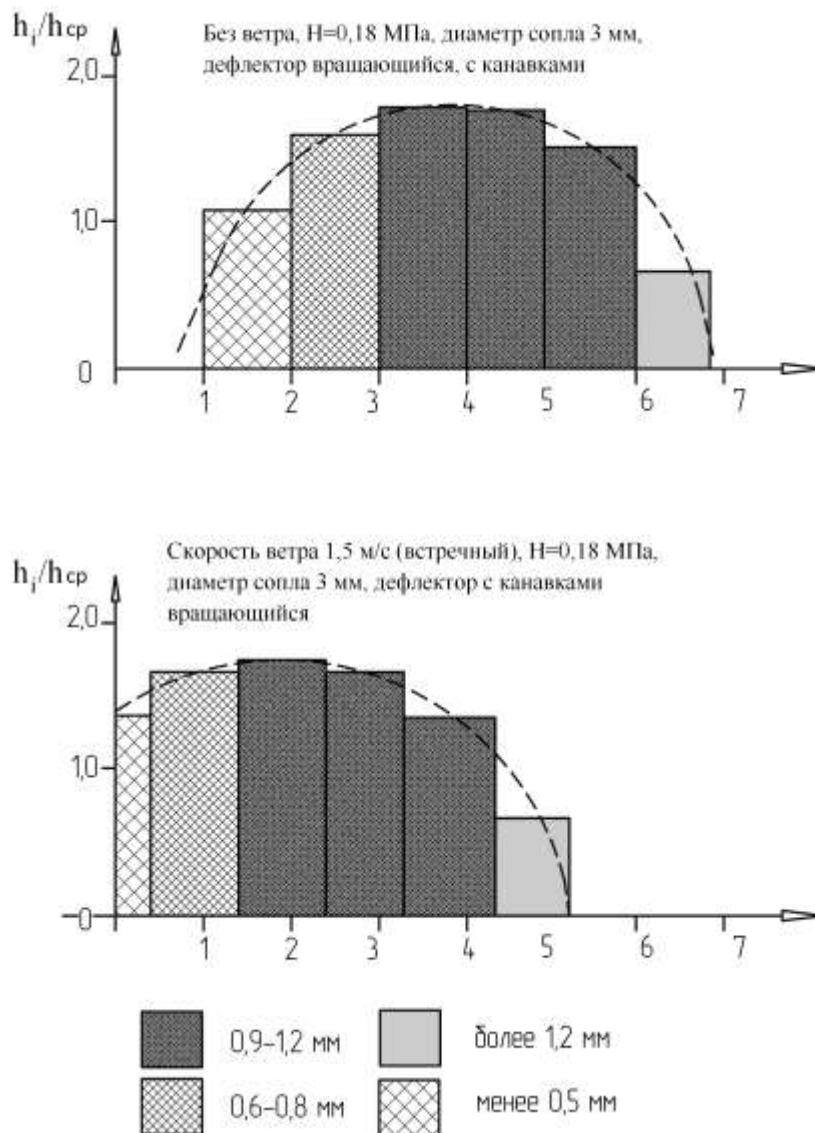


Рисунок 4.23 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса

полива без ветра и при ветре для дождевателей исполнения 5

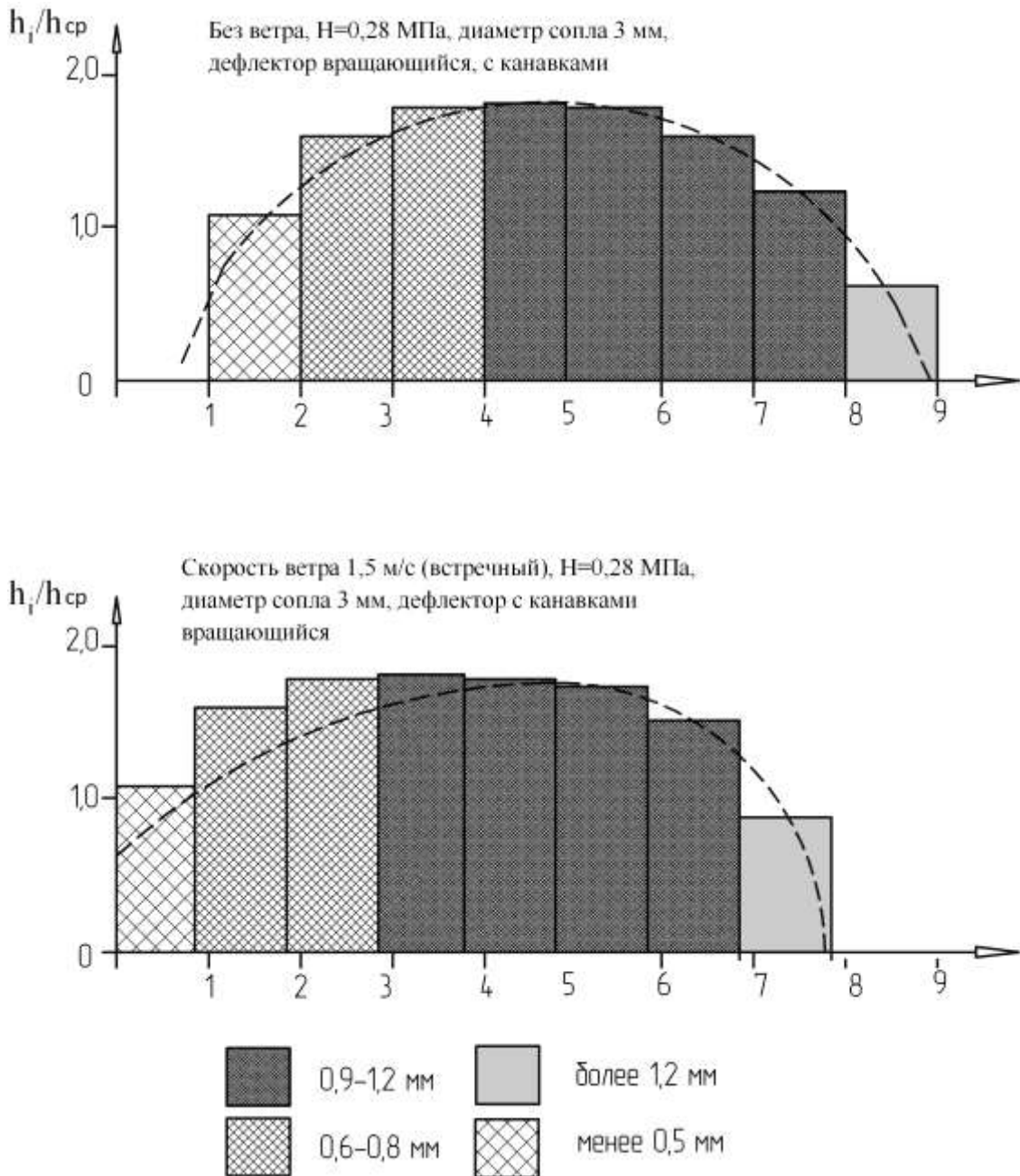


Рисунок 4.24 – Распределение нормированного слоя дождя вдоль радиуса полива без ветра и при ветре для дождевателей исполнения 5

Каскадные дождеватели имеют хорошую равномерность полива. Соотношение получаемых фракций зависит от формы и вида дефлекторов. Наиболее высокие показатели при всех режимах соответствуют соотношению

диаметра сопла и отверстия в верхнем дефлекторе 1:0,7 и дефлекторам с канавками малого и среднего размера.

4.4 Расстановка дождевателей на водопроводящем поясе дождевальных машин

Одним из важнейших факторов, влияющих на эффективность орошения дождеванием, является равномерность распределения слоя по площади полива. Потери урожая от неравномерного полива прямо пропорциональны коэффициенту неравномерности. Сложность выбора оптимальной расстановки дождевателей заключается в одновременном учете большого числа 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:

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 стационарным 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 со $\frac{1}{2}$ 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.

4.5 Результаты исследований широкозахватных дождевальных машин с установленными дождевателями

Потери воды на испарение и снос ветром при поливе дождеванием

Потери воды на испарение и унос ветром зависят главным образом от высоты подъема дождевого облака, среднего диаметра капель дождя и показателя напряженности метеорологических факторов.

Для определения потерь воды на испарение и унос ветром, %, была использована преобразованная зависимость [63-65]:

$$E_{\text{иу}} = 1,22 \frac{h_{\text{п}}^{0,6}}{d_{\text{к}}^{0,6} \rho_{\text{ср}}^{0,2} \rho_{\text{мг}}^{0,1}} \left[\left(1 - \frac{\varphi_{\text{в}}}{100} \right) (V'_{\text{в}} + 1) \right]^{0,5} K_{\alpha}, \quad (4.1)$$

$h_{\text{п}}$ – высота подъема капель дождя над почвой, м;

$\varphi_{\text{в}}$ – относительная влажность воздуха, %;

$V'_{\text{в}}$ – скорость ветра, м/с;

K_α – коэффициент зависимости величины испарения и уноса дождя с зависимости от угла между трубопроводом машины и направлением ветра;

d_K – средний диаметр капель, мм;

$\rho_{\text{ср}}, \rho_{\text{мг}}$ – средняя и мгновенная интенсивность дождя, мм/мин.

$$K_\alpha = 1 - 0,009(90 - \alpha'_0), \quad (4.2)$$

Результаты экспериментальных исследований, выполненных в Агроцентре СГАУ, на полях УНПО «Поволжье» ФГБОУ ВО Саратовский ГАУ (с. Степное Энегельского района Саратовской области) и ООО «Наше дело», Саратовская область, Марксовский район, показали, что нормы полива низконапорными ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД), и ДМ КАСКАД оборудованными дождеобразующими устройствами для приповерхностного полива с дождевателями типа 1, соответствуют нормативным значениям.

Расстановкой мерных емкостей на поле устанавливали фактическую норму полива машиной «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД). Для сбора воды у поверхности почвы были изготовлены специальные пробоотборники, в виде воронки, помещенной в стеклянную бутылку. Полученные теоретические и экспериментальные зависимости представлены на графиках 4.25-4.26 [30].

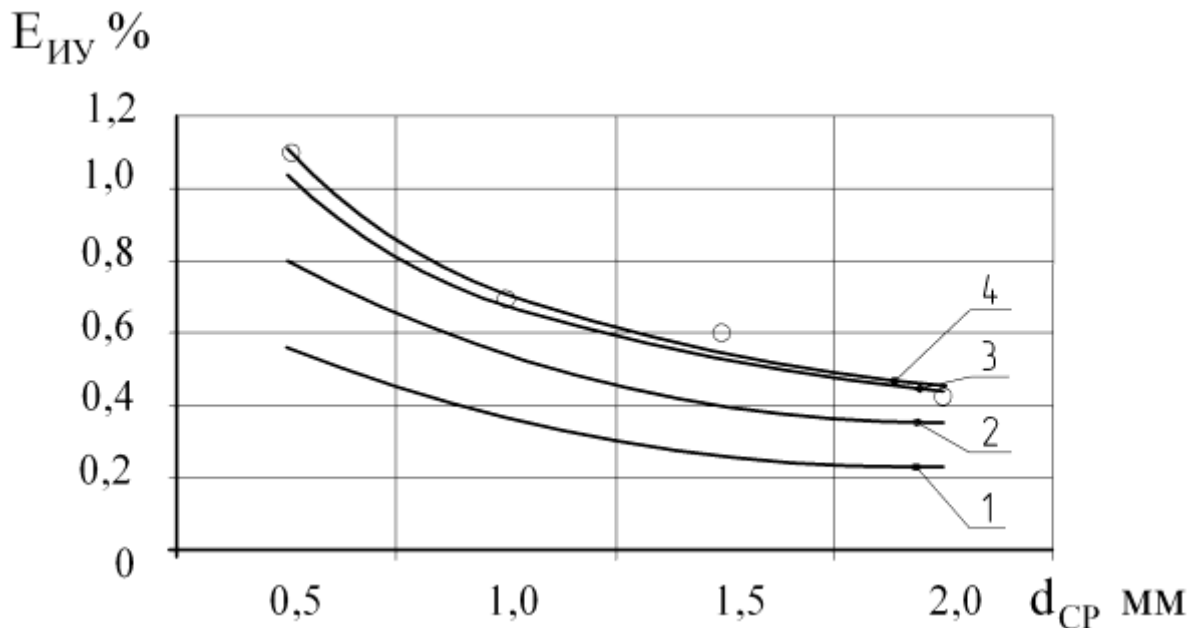


Рисунок 4.25 – Зависимость величины потерь на испарение и снос ветром от диаметра капель при безветрии:

1 – теоретическая, при высоте установки дождевателя $h_{\text{П}}=1$ м; 2 – теоретическая, при высоте установки дождевателя $h_{\text{П}}=2$ м; 3 – теоретическая,

при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=3$ м; 4 – экспериментальная, $E_{ИУ}=0,712d_{СР}^{-0,64}$, при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=3$ м, $R^2 =0,97$ (дождеватель типа 1, исполнение 1)

Из зависимостей величины испарения и сноса ветром от диаметра капель при установке дождевателей на высоте 1, 2, 3 видно, что потери воды на испарение и унос ветром увеличиваются с ростом высоты подъема дождевого облака и уменьшением крупности капель.

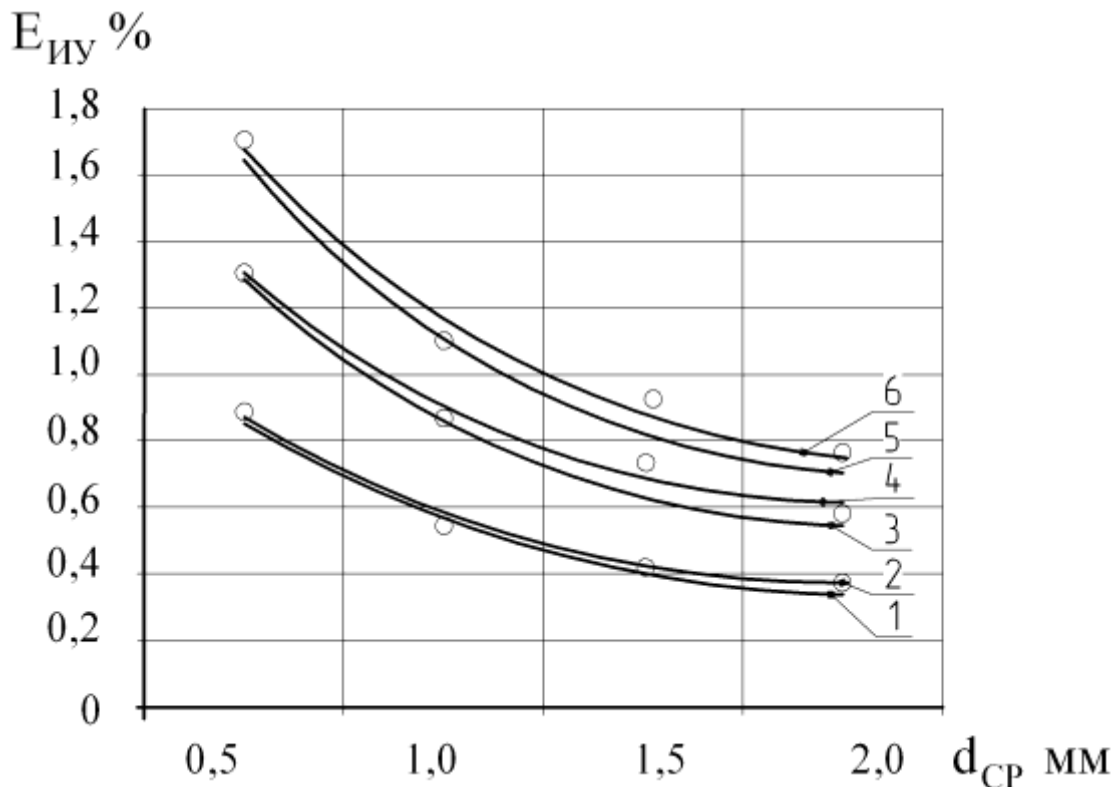


Рисунок 4.26 – Зависимость величины потерь на испарение и снос ветром от диаметра капель при ветре 1,5 м/с:

1 – экспериментальная, при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=1$ м, $E_{ИУ}=1,174d_{СР}^{-0,49}$, $R^2 =0,97$ (дождеватель типа 1, исполнения 1);

2 – теоретическая, при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=1$ м;

3 – экспериментальная, при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=2$ м, $E_{ИУ}=0,892d_{СР}^{-0,54}$, $R^2 =0,94$ (дождеватель типа 1, исполнения 1);

4 – теоретическая, при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=2$ м;

5 – экспериментальная, $E_{ИУ}=0,563d_{СР}^{-0,63}$, при высоте установки дождевателя $h_{\Pi}=3$ м, $R^2 =0,97$ (дождеватель типа 1, исполнения 1);

6 – теоретическая, при высоте установки 3 м.

Анализ зависимости показывает, что основным направлением снижения потерь воды на испарение и унос ветром является уменьшение высоты подъема дождевого облака.

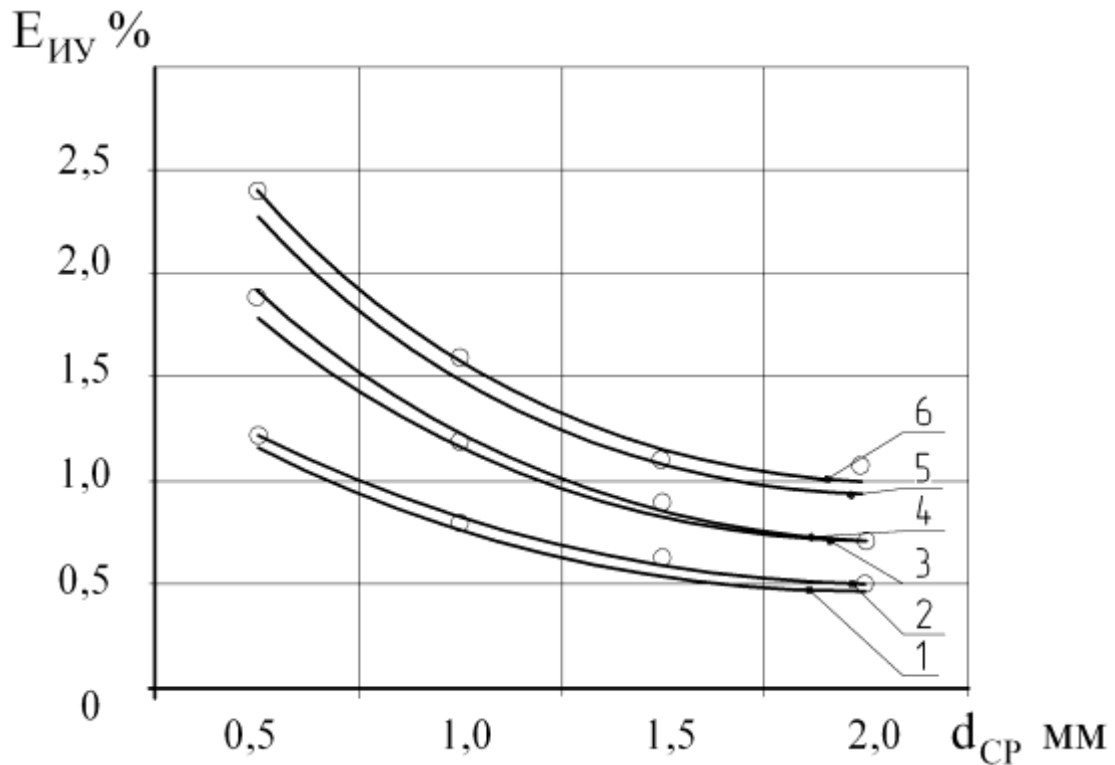


Рисунок 4.27 – Зависимость величины потерь на испарение и снос ветром от диаметра капель при ветре 3 м/с:

1 – экспериментальная, при высоте установки дождевателя $h_{П}=1$ м, $E_{иу}=0,747d_{ср}^{-0,54}$, $R^2=0,99$;

2 – теоретическая, при высоте установки дождевателя $h_{П}=1$ м;

3 – экспериментальная, при высоте установки дождевателя $h_{П}=2$ м, $E_{иу}=1,115d_{ср}^{-0,61}$, $R^2=0,98$;

4 – теоретическая, при высоте установки дождевателя $h_{П}=2$ м;

5 – экспериментальная, $E_{иу}=1,453d_{ср}^{-0,64}$, при высоте установки дождевателя $h_{П}=3$ м, $R^2=0,99$; 6 – теоретическая, при высоте установки 3 м.

Очевидна необходимость оптимизация степени распыления струи. При увеличении давления воды перед дождевателем крупность капель формируемого дождя уменьшается, создавая водяную пыль с диаметром капель до 0,2 мм, увеличивая потери на испарение и унос ветром. В связи с этим необходимо придерживаться степени распыления струи до значений 0,5...1,0 мм и при выборе дождевателей в соответствии с крупностью капель дождя учитывать также высоту установки над поверхностью земли и режимам ветра [30].

Т.е. тенденция при прочих равных условиях следующая: при подъеме дождеобразующего устройства над поверхностью земли следует:

–уменьшать угол вылета струи, что увеличивает ветроустойчивость;

–увеличивать размеры канавок дефлектора, что увеличивает диаметр капель дождя (в границах определяемых допустимой мощностью дождя).

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 (рис. 4.28).

Распределение объемов воды в мерных емкостях вдоль трубопровода ДМ приведено в таблицах приложения 9.

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 0,34МПа – 0,76-0,8.

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 0,4МПа – 0,76-0,8.

При работе ДМ «КАСКАД» модели 497-90 с установленными по учащенной схеме через 3,5 м при давлении на входе в машину 0,35МПа 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 1/2 длины водопроводящего пояса и исполнения 1 до 1/2 водопроводящего пояса по учащенной схеме через 3,5 м при напоре на входе в машину 0,3МПа – 0,88.

При работе ДМ «КАСКАД» длиной 434 м с дождевателями типа 2 исполнения 6 с 2/3 длины водопроводящего трубопровода и исполнения 2 типа 1 до 2/3 длины через 4,5м при напоре на входе в машину 0,35МПа – 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 0,35-0,4МПа – 0,86.



Рисунок 4.28 – Дождевое облако при работе дождеобразующих устройств при поверхностного полива

4.6 Оценка энергетических показателей при поливе широкозахватными дождевальными машинами 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 воспользуемся формулой [35]

$$V_K = 4,11d_K^{0,5}, \quad (4.4)$$

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

$$N_{уд} = 0,0083\rho_{ср} \sum_{i=1}^n (n_i V_{ki})^2 = 0,14\rho_{ср} d_k. \quad (4.5)$$

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

n_i – доля капель i -го размера;

V_{ki} – скорость падения капель i -го размера.

Оценка мощности дождя вдоль трубопровода ДМ с дождевателями разных типов представлены в таблице 4.1.

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 4.2.

Таблица 4.1 – Оценка мощности дождя вдоль трубопровода ДМ с дождевателями разных типов

Тип дождевателя	Расход, л/с	Давление, МПа	Средняя интенсивность, мм/мин	Средний диаметр капель, мм	Скорость падения капель, м/с	Средняя Мощность дождя, Вт/м ²
ДМ «Фрегат»						
Схема расстановки 1	0,15	0,12	0,09	0,71	3,46	0,009
	0,25	0,26	0,25	0,53	2,99	0,018
	0,29	0,15	0,33	0,55	3,04	0,025
	0,51	0,22	0,38	0,60	3,18	0,032
	0,53	0,24	0,49	0,62	3,23	0,042
	0,62	0,19	0,46	0,65	3,31	0,042
	1,00	0,27	0,59	0,69	3,41	0,057
	1,41	0,23	0,75	0,70	3,43	0,073
	1,53	0,25	0,77	0,73	3,51	0,078
	1,66	0,33	0,82	0,79	3,65	0,091
	1,80	0,24	0,85	0,81	3,69	0,096
	1,93	0,20	0,91	0,83	3,74	0,105
	3,78	0,23	0,98	0,85	3,78	0,116
ДМ «Кубань-ЛК1М» (КАСКАД) и ДМ «КАСКАД»						
Схема расстановки 3 (мелкие)	0,16	0,15	0,06	0,61	3,21	0,005
	0,21	0,29	0,22	0,51	2,93	0,015
	0,29	0,20	0,29	0,52	2,96	0,021
	0,32	0,25	0,31	0,55	3,04	0,023

канавки)	0,36	0,27	0,35	0,57	3,10	0,027
	0,46	0,25	0,39	0,59	3,15	0,032
	0,52	0,22	0,43	0,61	3,21	0,036
	0,73	0,30	0,48	0,64	3,28	0,043
	0,98	0,28	0,53	0,66	3,33	0,048
	1,13	0,26	0,61	0,68	3,38	0,058
	1,23	0,28	0,66	0,71	3,46	0,065
	1,32	0,31	0,72	0,74	3,53	0,074
	1,52	0,27	0,78	0,76	3,58	0,082
	1,71	0,23	0,80	0,78	3,62	0,087
	2,45	0,24	0,86	0,81	3,69	0,097
	3,50	0,26	0,92	0,83	3,74	0,106
	Схема расстанов ки 4	0,15	0,13	0,11	0,60	3,18
0,21		0,24	0,24	0,58	3,13	0,019
0,24		0,13	0,32	0,60	3,18	0,026
0,34		0,20	0,36	0,64	3,28	0,032
0,39		0,22	0,45	0,66	3,33	0,041
0,43		0,17	0,49	0,69	3,41	0,047
0,51		0,25	0,52	0,73	3,51	0,053
0,72		0,21	0,69	0,79	3,65	0,076
0,93		0,23	0,57	0,55	3,05	0,043
1,31		0,31	0,61	0,63	3,26	0,053
1,63		0,28	0,69	0,66	3,33	0,063
2,01		0,22	0,73	0,69	3,41	0,070
2,88		0,19	0,77	0,72	3,48	0,077
3,21	0,21	0,81	0,75	3,55	0,085	
Схема расстанов ки 5	0,2	0,16	0,10	0,67	3,36	0,009
	0,27	0,28	0,23	0,51	2,93	0,016
	0,31	0,19	0,31	0,52	2,96	0,022
	0,54	0,26	0,34	0,59	3,15	0,028
	0,57	0,28	0,43	0,61	3,21	0,036
	0,69	0,23	0,45	0,64	3,28	0,040
	1,30	0,29	0,52	0,64	3,28	0,046
	1,71	0,27	0,63	0,66	3,33	0,058
	1,84	0,29	0,69	0,68	3,38	0,065
	1,95	0,31	0,73	0,73	3,51	0,074
	2,24	0,26	0,79	0,75	3,55	0,082
	2,56	0,24	0,82	0,79	3,65	0,090
	2,69	0,29	0,85	0,81	3,69	0,096
	3,33	0,31	0,89	0,82	3,72	0,102
	3,78	0,23	0,90	0,84	3,76	0,105

Таблица 4.2 – 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	0,015	1,04
Пятый пролет	Мелкие канавки	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 4.2 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.

4.7 Норма полива до стока при поливе широкозахватными дождевальными машинами с низконапорными дождевателями

Исследования нормы полива до стока при поливе ДМ, оборудованными низконапорными дождевателями согласно предложенным схемам представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Фактические и расчетные значения несущей способности почвы от режима орошения

Тип почвы	Несущая способность почвы до полива $R_{дц}$, кПа	Схема расстановки дождевателей на машине	Эффективная норма полива, $m^3/га$	Достоковая норма полива, $m_{дост}^3/га$	Величина стока $m_{ст}^3/га$	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	295	382	0	160	135,2
	«КАСКАД»	420	390	30	145	131,5
		500	395	105	125	119,6

У серийно выпускающихся дождевальных 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.

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.

4.8 Равномерность полива широкозахватными дождевальными машинами, оборудованными низконапорными дождевателями

Основные показатели оценки работы низконапорных ДМ приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Показатели работы дождевальных машин «Фрегат» ДМУ-Б 463-90 и «Кубань-ЛК1»

Наименование показателей	Дождевальная машина	
	«Фрегат» ДМУ-Б 463-90	Кубань-ЛК1 МДЭК 212
Схема расстановки дождевателей	1	2
Дата проведения исследований	10.07-25.07. 15	10.05-25.05.15
Агрофон	кукуруза	-
Температура воздуха, град	17	21
Скорость ветра, м/с	3,8	2,7
Напор, МПа на входе в машину в конце машины	0,41 0,27	0,21 0,17
Расход, л/с	72,5	14,6
Радиус полива, м	484	212
Площадь, орошаемая с одной позиции, га	73	14,11
Средняя интенсивность дождя, мм/мин	0,533	0,547
Минимальный слой осадков за проход, мм	30	8,5
Коэффициент полива: эффективного	0,801	0,805
недостаточного	0,102	0,101
избыточного	0,097	0,094
Средний диаметр капель, мм	0,85	0,86
Глубина колеи под последней тележкой (в конце поливного сезона), м	0,16	-
Коэффициент земельного использования в пределах орошаемого круга	0,982	0,986

Исследования ДМ проводились при номинальном давлении на входе в машины, равным 0,41 для «Фрегата» и 0,21 – для «Кубани -ЛК1».

Гидравлические потери по длине водопроводящего трубопровода соответственно составляют 0,14 и 0,04 МПа.

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.

5 ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ДОЖДЕВАТЕЛЕЙ НА ШИРОКОЗАХВАТНЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИНАХ «ФРЕГАТ»

Использование низконапорных дождевателей, устанавливаемых через 5 и 6 м друг от друга на трубопроводе ДМ «Фрегат», позволяет повысить равномерность полива, снизить воздействие дождя на почву и ее уплотнение, благодаря меньшему диаметру капель, уменьшить потери воды на испарение и унос ветром, что обеспечит повышение урожайности кукурузы на 8 % (табл. 5.1).

Таблица 5.1– Экономическая оценка внедрения низконапорных дождевателей (без удобрений)

Показатели	Базовая ДМ «Фрегат»	Модернизированная ДМ «Фрегат»
Сельскохозяйственная культура	Кукуруза	
Коэффициент эффективности полива при скорости ветра 3 м/с	0,68-0,72	0,76-0,81
Потери воды на испарение и снос, %	8-11	2,5-5
Крупность капель дождя, мм	0,85-1,2	0,7-0,85

Средняя скорость падения, м/с	3,8-4,5	3,4-3,8
Мощность дождя, Вт/м ²	0,02-0,05	0,01-0,02
Средняя урожайность кукурузы на силос, т/га за 3 года	87,4	94,3
Прибавка урожая, т/га		6,9
Годовой экономический эффект, руб/маш		448920

Средний урожай кукурузы на участках полива ДМ «Фрегат», оборудованных низконапорными дождевателями выше в среднем на 6,9 т/га, чем на участках полива серийными дождевальными аппаратами, что достигнуто за счет более равномерной подачи оросительной воды; уменьшения среднего диаметра капель дождя и его мощности; уменьшения плотности верхнего слоя почвы.

Дополнительный валовой сбор ее на площади полива 72,3 га ДМ «Фрегат» составил 498,8 т. Экономический эффект составил:

$$\text{Э}_p = 498,8 \cdot 980 \text{ руб} = 448920 \text{ руб на машину.}$$

При стоимости одного комплекта низконапорных дождевателей для 16-опорной ДМ «Фрегат» соответственно 43,6 тыс. руб. оборудование окупается в первый год эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Повышение эффективности работы широкозахватных дождевальных машин связано с разработкой новых низконапорных дождевателей. Теоретические и экспериментальные исследования позволили определить конструктивно-технологические параметры дождевателей для различных условий эксплуатации и режимов работы, определить схемы их установки вдоль трубопровода для модернизированных и новых образцов дождевальных машин.

Максимальный радиус захвата дождем спроектированных низконапорных дождевателей при изменении диаметра сопла от 3 до 15 мм при напоре 0,3 МПа составляет 4,5 – 13 м. Средняя интенсивность дождя изменяется в границах от 0,08 до 1,2 мм/мин.

Оборудование модернизированных и новых образцов дождевальных машин разработанными 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 – дождеватели со стационарным или вращающимися дефлекторами, имеющими крупные и средние канавки, для щадящего воздействия на почву и растения – дождевателей с дефлекторами, имеющими мелкие канавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдразаков Ф.К. Повышение эффективности системы управления электрифицированной дождевальной машины кругового действия «КАСКАД» / Ф.К. Абдразаков Л.А. Журавлева, А.П. Лонькин, А.В. и др. – Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2018. – С.
2. 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.
3. Бородин В. А. Распыливание жидкостей / В.А. Бородин. – М.: Машиностроение, 1967. – 262 с.

4. Бредихин Н. П. Влияние ветра на работу дальнеструйных дождевателей и пути повышения качества полива: Автореф. дис. канд. техн. наук.– М., 1969. – 19 с.
5. Бубенчиков М. А. О снижении энергоемкости полива короткоструйными дефлекторными насадками / М. А. Бубенчиков, А. Н. Данильченко, Н. П. Пацер // Экологическое и экономическое обоснование технологии и технических средств полива: сб. науч. тр. ВНИИМиТП. – М., 1989. – С. 42-47.
6. Варлев И. Оптимальная равномерность полива / И. Варлев // Гидравлика и мелиорация. – М., 1981. – № 6.– С. 77–81.
7. Васильев А. Г. Исследование стационарной дождевальной системы с дефлекторными насадками в теплицах: Автореф. дис. канд. техн. наук. – М., 1978. – 21 с.
8. Васильев Б. А. И Исследование распределения капель в факеле распыленной жидкости / Б. А. Васильев, С. П. Ильин // Новое в технике и технологии полива: сб. науч. тр. ВНИИМиТП. – Коломна, 1974. – Т. 6. – С. 80–86.
9. Веденяпин Г.В. Общая методика экспериментального исследования и обработки опытных данных / Г.В. Веденяпин. – М.: Колос, 1973. – 159с.
10. Вуколов В. В. Разработка и выбор рабочих органов дождевальных машин для орошения при скорости ветра свыше 3 м/с: Автореф. дис. канд. техн. наук.– М., 1992. – 19 с.
11. Гомберг С. В. Совершенствование технико-технологических показателей полива дождевальной машиной «Фрегат»: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Саратов, 2007. – 19 с.
12. Городничев В. И. Современные средства контроля для оценки качества работы поливной техники / В.И. Городничев // Проблема устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования. Матер. юбилейной межд. науч.-практ. конф. – М., 2007. – С. 122–130.

13. Городничев В. И. Оценка крупности капель / В.И. Городничев // Основные направления технического прогресса механизации и техники полива: сб. науч. тр. – М.: ВНИИМиТП, 1983. – С. 102–110.

14. Городничев В.И. Методика оценки и технические средства контроля показателей режима и качества полива при Госиспытаниях дождевальной техники / В.И. Городничев // Ресурсосберегающие экологически безопасные системы орошения и сельхозводоснабжения. – Коломна: ФГНУ ВНИИ "Радуга", 2002. – С.78-83.

15. 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.

16. ГОСТ ИСО 8224-1-2004. Машины дождевальные подвижные. Часть 1. Эксплуатационные характеристики и методы лабораторных и полевых испытаний. – М.: Стандартинформ, 2004. – 29с.

17. Гринь Ю. Н. Вопросы применения низконапорных дождевальных машин «Фрегат» / Ю. Н. Гринь, И. А. Гамрецкий // Экономия энергозатрат и повышение экологической безопасности поливов: сб. науч. тр. СтавНИИГиМ. – Ставрополь, 1994. – С. 10-14.

18. Губер К.В. Дождевальные машины и их применение / К.В. Губер. Россельхозиздат, 1975. – 70с.

19. 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.

20. Дитякин Ю.Ф. Распыливание жидкостей / Ю.Ф. Дитякин, Л.А Клячко, Б.В. Новиков и др. – М.: Машиностроение, 1977. – 208с.

21. Доспехов Б.А. Методика полевого опыта/ Б.А. Доспехов. – М.: «УОУО Media», 2012. – 352 с.

22. Доспехов Б.А. Практикум по земледелию / Б.А. Доспехов, И.П. Васильев, А.И. Туликов. – М.: Агропромиздат, 1987. – 383с.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Журавлева Л.А. Повышение равномерности распределения дождя широкозахватных дождевальных машин при ветре / Л.А. Журавлева // Основы рационального природопользования. Сб. науч. трудов. – Саратов: ФГОУ ВПО Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, 2005. – С. 166-170.

27. Журавлева Л.А. Совершенствование дождеобразующих устройств широкозахватных дождевальных машин / Л.А. Журавлева, А.Н. Ковалев // Основы рационального природопользования. Матер. 3 Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2011. – С. 262-265.

28. Журавлева Л.А. Теоретические исследования влияния геометрических характеристик дождевальных насаждений на радиус полива с учетом воздействия ветра/Л.А. Журавлева//Проблемы научного обеспечения сельскохозяйственного производства и образования. Сб. науч. работ. – Саратов: Саратовский ГАУ им. Н.И. Вавилова, 2008. – С. 52-55.

29. Журавлева Л.А. Повышение ветроустойчивости дождеобразующих устройств с поворотным и эластичным дефлекторами / Л.А. Журавлева, А.Н. Ковалев // Основы рационального природопользования. Матер. 3 Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2011. – С.283-288.

30. Журавлева Л.А. Оценка испарения и сноса дождя при дождевании / Л.А. Журавлева, А.С. Попов // Исследования в строительстве, теплогазоснабжении и энергообеспечении. Матер. Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2016. – С. 120-123.

31. Журавлева Л.А. Возрождение орошения в Саратовской области / Л.А. Журавлева // Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства. Сб. статей 6 Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2016. – С. 95-97.
32. Журавлева Л.А. Равномерность распределения воды при орошении дождевальными насадками / Л.А. Журавлева // Проблемы и перспективы инновационного развития мирового сельского хозяйства. Сб. статей 6 Межд. науч.-практ. конф. – Саратов: ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2016. – С. 100-102.
33. Исаев А.П. Гидравлика дождевальных машин / А.П. Исаев. – М.: Машиностроение, 1973. – 214 с.
34. Исаев А.П. Гидравлика и гидромеханизация сельскохозяйственных процессов. / А.П. Исаев, Б.И. Сергеев, В.А. Дидур. – М.: Агропромиздат, 1990. – 400 с.
35. Карпова О.В. Усовершенствованные устройства приповерхностного дождевания дождевальной машины «Фрегат»: дис. ...канд. техн. наук. – Саратов, 2017. – 197 с.
36. Каталог. I-Wob Senninger. Дождеватель для механизированного орошения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.senninger.com – (Дата обращения: 26.01.2018).
37. Кузнецова Е.И. Орошаемое земледелие: учебное пособие / Е. И. Кузнецова, Е. Н. Закабунина, Ю.Ф. Снопич. – М.: ФГБОУ ВПО РГАЗУ, 2012. –117 с.
38. Ларионова А.М. Пути повышения качества полива дождевальными машинами / А.М. Ларионова, Г.А. Михалева, Е.В. Шевцов // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы. Сб. науч. трудов Межд. науч.-практ. конф.– 2016. –С.360-365.
39. Лебедев Б.М. Дождевальные машины / Б.М. Лебедев. – М.: Машиностроение, 1965. – 225с.

40. Методические рекомендации по учету поверхностного стока и смыва почв при изучении водной эрозии. – Л.: Гидрометеоздат, 1975. – 88 с.

41. Михалев Н. В. Обоснование технологических и технических решений по распределению стоков дождевальными машинами кругового действия: Дис. ... канд. техн. наук. – М., 2000. – 155 с.

42. Нагорный В. А. Использование ДМ «Фрегат» с дефлекторными насадками / В. А. Нагорный, Н. Ф. Рыжко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. - Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2009. - № 1. – С. 85-90.

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

44. Нагорный В. А. Использование ДМ «Фрегат» с дефлекторными насадками / В. А. Нагорный, Н. Ф. Рыжко // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2009, – № 1. – С. 85-90.

45. Надежкина Г. П. Совершенствование устройств приповерхностного дождевания дождевальной машины «Фрегат»: дис. ... канд. техн. наук. – Саратов, 2014. – 167 с.

46. Надежкина Г.П. / Равномерность полива ДМ «Фрегат» с устройствами приповерхностного дождевания / Г.П. Надежкина, В.В. Слюсаренко. // Инновации в природообустройстве и защите в чрезвычайных ситуациях. Матер. III Межд. науч.-практич. конф. – Саратов: ФГБОУ ВО «Саратовский ГАУ», 2016. – С.12-16.

47. 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 «Росинформагротех», 2015. – 264 с.

48. Пажи Д. Г. Распылители жидкости / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.

49. Пажи Д.Г. Основы техники распыливания жидкостей / Д.Г. Пажи, В.С. Галустов. – М.: Химия, 1984. – 256 с.

50. Патент РФ №2643841. Соловьев Д.А., Соловьев В.А., Кузнецов Р.Е., Журавлева Л.А., Гомберг С.В. Дождеватель // Патент России № 2016146548. Публ. 06.02.2018. Бюл.№4.

51. Патент РФ № 2317153. Кузнецов Р.Е., Соловьев Д.А., Журавлева Л.А., Краев С.Г. Дождевальная насадка // Патент России № 2006109774. Зарег. 20.02.2008. Публ. 20.02.2008. Бюл.№5.

52. Патент РФ № 2321250. Соловьев Д.А., Журавлева Л.А., Краев С.Г., Айбушев Н.Р. Дождевальная насадка // Патент России № 2006100522. Зарег. 10.04.2008. Публ. 10.04.2008. Бюл.№10.

53. Патент РФ № 2315470. Соловьев Д.А., Журавлева Л.А., Кузнецов Р.Е., Краев С.Г. Дождевальная насадка // Патент России № 200610287/12. Зарег. 27.01.2008. Публ. 27.01.2008. Бюл.№3.

54. Патент РФ № 2316947. Соловьев Д.А., Журавлева Л.А., Кузнецов Р.Е., Краев С.Г. Дождевальная насадка // Патент России № 2006107072С2. Зарег. 20.02.2008. Публ. 20.02.2008. Бюл.№5.

55. Патент РФ №2316946. Соловьев Д.А., Журавлева Л.А., Кузнецов Р.Е., Краев С.Г. Дождевальная насадка // Патент России № 2006107017С2. Зарег. 20.02.2008. Публ. 20.02.2008. Бюл.№5.

56. Полезная модель РФ. 173434. Соловьев Д.А., Соловьев В.А., Журавлева Л.А., Кузнецов Р.Е., Гомберг С.В. Дождевальная насадка // Полезная модель России № 2016146563. Публ. 28.08.2017. Бюл.№25.

57. Полезная модель РФ № 173433. Соловьев Д.А., Соловьев В.А., Журавлева Л.А., Кузнецов Р.Е., Гомберг С.В. Дождевальная насадка // Полезная модель № 2016146571. Публ. 28.08.2017. Бюл.№25.

58. Просветов Ю.С. Влияние характеристик дождя, создаваемого широкозахватными дождевальными машинами, на условия произрастания сельскохозяйственных культур: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Новочеркасск, 1982. – 22 с.

59. Руководство по эксплуатации. Техническое описание и инструкции. Машина дождевальная электрифицированная круговая КАСКАД. – Саратов, 2017. – 133с.

60. Руководство по эксплуатации ДМФ-К-00.00.000РЭ. Машина дождевальная ферменная кругового действия «Фрегат» с тросовой системой управления. – 2013. – 81с.

61. Рыжко Н.Ф. Обоснование ресурсосберегающего дождевания / Н.Ф. Рыжко // – Саратов: Вестник Саратовского Госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова, 2014. – № 7. – С. 40–45.

62. 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.

63. Рыжко Н.Ф. Совершенствование дождеобразующих устройств для многоопорных дождевальных машин: монография / Н.Ф. Рыжко. – Саратов: ФГОУ ВПО «Саратовский ГАУ», 2009. – 176 с.

64. 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.

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

66. Рыжко Н.Ф. Оценка и расчет равномерности полива дождевальных аппаратов и дефлекторных насадок / Н.Ф. Рыжко, Е.И. Гуркин, Ю.А. Емельянов // Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова. – 2009. – № 3. – С. 41–45.

67. Сальников А.Л. Совершенствование конструкций дождевателей для мобильных дождевальных машин / А.Л. Сальников, В.Е. Руденко, А.Г. Беспалов, В.Г. Абрезин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса. – 2013. – №4.– С. 209-214.

68. Слюсаренко В.В. Дождевальные машины XXI века / В.В. Слюсаренко, Л.А. Журавлева // Техника машиностроения. – 2003. – №6. –С. 84-87.

69. Слюсаренко В.В. Опыт эксплуатации ДМ «Фрегат» на низконапорном режиме / В.В. Слюсаренко, Л.А. Журавлева // Мелиорация и водное хозяйство. – 2004. – №1. –С. 22-24.

70. Слюсаренко В.В. Усовершенствование дождевальных машин / В.В. Слюсаренко, Журавлева Л.А. // Вестник машиностроения – 2003. –№10. –С. 83-85.

71. Стандарт организации испытаний сельскохозяйственной техники: Машины и установки дождевальные. СТО АИСТ 11.1 –2010. Дата введения – 2011–04–15.

72. СТО АИСТ 001–2010. Агротехническая оценка сельскохозяйственной техники. Термины и определения / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2013. – 60 с.

73. СТО АИСТ 11.1–2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2012. – 54 с.

74. Филимонов М.И. Дефлекторно-эжекторные дождевальные насадки для энерго- и ресурсосберегающего орошения / М.И. Филимонов, А.Е. Новиков, М.И. Ламскова //Альманах-2017. – Волгоград. – С.115-122.

75. Черноволов В.А. Математическое моделирование процессов распределения жидкостей в агротехнологиях: монография / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко. –Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт, ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2016. –208с.

76 Щедрин В.Н. Оросительные системы России: от поколения к поколению: монография в 2ч. / В.Н Щедрин, А.В Колганов. – Новочеркасск, 2013. –283с.

77 Щедрин В.Н. Результаты расчета жесткого пролета водопроводящего пояса для дождевальной машины вантовой конструкции / В.Н. Щедрин,

А.А.Чураев, Ю.Ф. Снопич, Л.В. Юрченко, В.М. Школьная // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. – 2016.– №4(24). – С.22-39.

78 Шепелев А.Е. Дождеобразующие устройства зарубежной широкозахватной многоопорной дождевальнoй техники / А.Е. Шепелев, В.Э. Завалюев // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – Новочеркасск, 2015. – №3. – С.191-195.

79. Штепа Б.Г. Механизация полива: справочник / Б.Г. Штепа, В.Ф. Носенко, Н.В. Винникова и [др.] – М.: Агропромиздат, 1990. – 336 с.

80 Bradley A. King. Optimal Performance from Center Pivot / A. King Bradley and C. Dennis // Copyright © 1997 University of Idaho College of Agriculture . Co-operative Extension System | Agricultural Experiment Station. – 1997. – P. 20.

81 Catalog–Komet–Pivot–5–Features. Komet Austria GmbH. [Электронный ресурс]. –Режим доступа: www.kometirrigation.com– (Дата обращения: 19.03.2018).

82 Freddie R. Lamm. Erraticity of Sprinkler irrigated Corn in 2011/ Lamm R. Freddie, Terry A. Howell, James P. Bordovsky // Proceedings of the 24th Annual Central Plains Conference, Colby, Kansas, February 21-22, 2012. – P 88-101.

83. Jiao Jian. Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems /Jian Jiao, Yadong Wang, Liliang Han and Derong Su // Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University. Published: 21 April, 2017– P. 1-17.

84. Kisambuli Eric Kilaka. The effects of windbreaks on the effectiveness of sprinkler irrigation systems / Eric Kisambuli Kilaka. // Waterways Centre for Fresh-water Management University of Canterbury Christchurch, New Zealand, 2015. – P. 169.

85. Rain Bird. Landscape Irrigation Design Manual. 2000 Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation. All rights reserved. Rain Bird Corporation, Tucson, AZ 85706 USA. –126 p.

86. 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 Engineering. № 104, 3. – 1978. – P. 293-306.