МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ДЕПАРТАМЕНТ НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

АЗОВО-ЧЕРНОМОРСКИЙ ИНЖЕНЕРНЫЙ ИНСТИТУТ – ФИЛИАЛ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ» В Г. ЗЕРНОГРАДЕ
(Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ)

**В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко**

# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В АГРОТЕХНОЛОГИЯХ



Зерноград – 2016

УДК 631.347.4.001.57
Ч49

ISBN 978-5-91833-164-4

**Рецензенты:**
заместитель директора по науке ФГБНУ РосНИИПМ,
доктор технических наук, профессор ***Косиченко Ю.М.***;
доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО
«ДагГАУ имени М.М. Джамбулатова» ***Фаталиев Н.Г.***

**Черноволов, В.А.** Математическое моделирование процессов
Ч49 распределения жидкостей в агротехнологиях: монография
/ В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко. – Зерноград: Азово-Черноморский
инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, 2016. – 208 с.

ISBN 978-5-91833-164-4

В монографии приведены программы моделирования работы аппаратов, испытанных радиальным методом, на стационарных системах, на машинах непрерывного поступательного и вращательного движения. Методика составления и исследования математических моделей распределения жидкостей может быть использована для моделирования и оптимизации процессов распределения жидких пестицидов и удобрений.

Монография представляет интерес для научных работников, конструкторов, студентов, магистров и аспирантов, занятых проектированием и оптимизацией машин для дождевания сельскохозяйственных культур.

ISBN 978-5-91833-164-4 УДК 631.347.4.001.57

© Черноволов В.А., Кравченко Л.В., 2016
© Азово-Черноморский инженерный
институт – филиал ФГБОУ ВО
Донской ГАУ, 2016

## Содержание

Введение……..... 6
1. Машины для орошения…… …… 9
1.1. Способы орошения…… 9
1.2. Основные элементы дождевальных систем…… 10
1.3. Дождевальные установки и машины……..... 20
1.4. Машины для поверхностного полива…….. 45
1.5. Системы капельного орошения…… 47
1.6. Машины для внутрипочвенного орошения…… 49
1.7. Рынок дождевальной техники в России…….. 50
1.8. Требования к машинам и энергоемкость полива……... 53
1.9. Краткий обзор исследований процесса дождевания…….. 54
1.10. Выводы…… 58
2. Моделирование процесса дождевания стационарными системами и машинами позиционного действия…… 60
2.1. Моделирование процесса дождевания струйными аппаратами при работе по кругу…… 60
2.2. Моделирование процесса дождевания дальнеструйными аппаратами при работе по сектору…… 75
2.3. Оптимизация расстояний между позициями среднеструйных аппаратов…… 83
2.4. Выводы…… 88
3. Моделирование распределения воды машинами и аппаратами непрерывного поступательного движения…… 89
3.1. Моделирование распределения воды машинами с аппаратами кругового действия…… 89
3.2. Моделирование распределения воды машинами с насадками секторного действия……. 93
4. Моделирование распределения воды машинами кругового движения…… 100
5. Методы исследований и испытаний дождевальных машин и аппаратов…… 108
5.1. Стандартные методы испытаний аппаратов……..... 108
5.2. Расчет показателей равномерности дождевания стационарными системами и машинами позиционного действия по результатам испытания аппарата радиальным методом……. 118
5.3. Расчет равномерности дождевания машиной непрерывного поступательного движения по результатам испытания аппарата радиальным методом……..... 122
5.4. Расчет равномерности дождевания машиной непрерывного вращательного движения по результатам испытания аппарата радиальным методом……..... 126
5.5. Методика исследования насадок секторного действия…….. 129

5.5.1. Описание экспериментальной установки…….. 129
5.5.2. Методика лабораторных исследований……..... 132
5.5.3. Программа опытов…… 135
5.5.4. Обработка результатов экспериментов……. 136
5.5.5. Порядок вычисления коэффициентов уравнения регрессии……..... 138
6. Результаты экспериментальных исследований…… 140
6.1. Распределение воды секторными насадками по радиусам зоны дождевания…… 140
6.2. Распределение воды по секторам дефлекторными насадками дождевальных машин……. 145
6.3. Оптимизация размещения насадок на трубопроводе……. 150
6.4. Выводы…… 154
7. Методика расчета параметров процесса дождевания машиной непрерывного фронтального перемещения……... 156
7.1. Расчет размещения насадок…….. 156
7.2. Выводы…… 162
Литература…… 163
Приложения…… 172
Приложение А – Программа *MD(A)* – Расчет дозы дождевания одноструйными аппаратами при работе на четырех позициях…….. 173
Приложение Б – Программа *KV(A)* – Вычисление матрицы доз на учетной площадке $\phi\check{I}\ \phi$ и по матрице доз – коэффициента вариации……. 175
Приложение В – Программа *Ke(A)* **–** Расчет эффективности дождевания одноструйными аппаратами при работе на четырех позициях…….. 176
Приложение Г – Программа вычисления показателей эффективности коэффициентов орошения: недостаточного, эффективного и избыточного полива, полноты учета…… 178
Приложение Д – Программа $D1(A)$ вычисления дозы полива на учетной площади размером $\phi\check{I}\ \phi$ двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций……..... 180
Приложение Е – Программа расчета эффективности орошения двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций…… 182
Приложение Ж – Программа *Ke12(A)* – Расчет показателей эффективности дождевания одноструйными аппаратами при работе на двенадцати позициях…… 184
Приложение З – Программа расчета показателей равномерности орошения двухсопловым аппаратом с двенадцати позиций……..... 187
Приложение И – Программа моделирования распределения воды односопловым дальнеструйным аппаратом с четырех позиций при работе по сектору…….. 189

Приложение К – Программа моделирования распределения воды двухсопловым дальнеструйным аппаратом на четырех позициях при работе по сектору……... 191
Приложение Л – Программа моделирования распределения воды двухсопловым дальнеструйным аппаратом на шести позициях при работе по сектору……... 193
Приложение М – Программа расчета равномерности дождевания двухсопловым аппаратом с шести позиций…….. 195
Приложение Н – Программа расчета интенсивности орошения машиной кругового действия……... 197
Приложение О – Программа расчета равномерности орошения машиной кругового действия……... 199
Приложение П – Программа расчета показателей эффективности орошения четырьмя стационарными аппаратами, испытанными радиальным методом…… 202
Приложение Р – Программа расчета равномерности орошения машиной непрерывного поступательного движения с аппаратами, испытанными радиальным методом…… 204
Приложение С – Программа расчета равномерности орошения машиной кругового действия с аппаратами, испытанными радиальным методом…….. 206

# ВВЕДЕНИЕ

В агротехнологиях используется большое разнообразие жидкостей. Наибольший удельный вес среди них занимает вода. Вода используется в орошении и в качестве растворителя для пестицидов и минеральных удобрений. Пресная вода является важнейшим природным ресурсом. Потребление воды с каждым годом увеличивается, а её запасы ограничены.

По этой причине экономное расходование воды является приоритетным для промышленности и сельского хозяйства.

Использование пресной воды к 2020 г. по прогнозным оценкам может возрасти по сравнению с 2005 г. на 6 млрд м$^3$ (11%) и составит 62,4 млрд м$^3$. Основной объем использования пресной воды придется на электроэнергетику – 25 млрд м$^3$, ЖКХ – 14 млрд м$^3$, сельское хозяйство – 13 млрд м$^3$. Забор пресной воды из природных водных объектов прогнозируется в объеме примерно 80 млрд м$^3$, в том числе из поверхностных водных объектов – 68,5 млрд м$^3$, из подземных источников – 11,5 млрд м$^3$. Использование пресной воды на перспективу может составить в зависимости от сценария социально-экономического развития страны к 2015 г. – 65…72,5 млрд м$^3$.

В сельском хозяйстве в связи с намечаемым развитием агропромышленного комплекса прогнозируется рост водопотребления. Для устойчивого обеспечения населения страны продовольствием по данным Минсельхоза России площадь орошаемых земель должна составлять 12,0 млн га, однако с учетом обеспеченности различных регионов оросительной водой она ограничена 10,1 млн га. В этой связи водопотребление в 2010 г. выросло с 11,3 до 13 млрд м$^3$ и прогнозировался рост потребления до 14…16 млрд м$^3$ к 2015 г. [1].

Дождевание – наиболее перспективный способ орошения, позволяющий максимально механизировать и автоматизировать его. При дождевании достигается высокая производительность, уменьшаются потери воды за счет гибкого управления поливом, обеспечивается сравнительно равномерное распределение воды.

Посевные площади нашей страны по степени увлажнения разделяются на гумидную (влажную), аридную (сухую) и субаридную (полувлажную, полузасушливую) зоны. Значительные площади сельскохозяйственных угодий в Нечерноземной зоне нуждаются в осушении, известковании и т.д. В Центрально-Черноземной зоне (Белгородская, Воронежская, Курская, Липецкая и Тамбовская области) в отдельные периоды вегетации наблюдается недостаточное увлажнение, неравномерное и часто неблагоприятное распределение осадков. Есть немало засушливых районов (Поволжье, Нижний Дон, Северный Кавказ и другие), где зимы бывают малоснежные, весна – короткая засушливая, а лето – жаркое и сухое.

В условиях недостаточного увлажнения расположено свыше 70% сельскохозяйственных угодий страны (около 60% пашни, 50% сенокосов и более

90% пастбищ). Почти на 40% сельскохозяйственных угодий выпадает 400 мм осадков в год. Две трети зерна пшеницы – основной культуры сельского хозяйства нашей страны – производят в засушливых районах южной части страны. Анализ погодных условий показывает, что в среднем 13 лет за столетие бывают крайне засушливыми.

Одним из основных мероприятий, способствующих получению устойчивых урожаев, является орошение. Орошением регулируют водный и тепловой режимы почвы, вносят растворы удобрений, удаляют из почвы избыток солей, а затоплением уничтожают грызунов и вредителей растений. Поэтому урожаи на орошаемых землях в 3–5 раз выше, чем на неорошаемых.

Наиболее распространенным способом орошения сельскохозяйственных культур является дождевание. Повышение эффективности и качества дождевания путем повышения равномерности распределения воды является важнейшей научной проблемой.

Математическое моделирование позволяет посредством математических символов и зависимостей составить описание функционирования технического объекта в окружающей внешней среде, определить выходные параметры и характеристики, получить оценку показателей эффективности и качества, осуществить поиск оптимальной структуры и параметров объекта. Применение математического моделирования при проектировании в большинстве случаев позволяет отказаться от физического моделирования, значительно сократить объемы испытаний и доводочных работ, обеспечить создание технических объектов с высокими показателями эффективности и качества. Одним из основных компонентов системы проектирования в этом случае становится математическая модель.

Математическая модель – это совокупность математических объектов и отношений между ними, адекватно отображающая физические свойства создаваемого технического объекта. В качестве математических объектов выступают числа, переменные, множества, векторы, матрицы и т.п. Процесс формирования математической модели и использования ее для анализа и синтеза называется математическим моделированием. В конструкторской практике под математическим моделированием обычно понимается процесс построения математической модели, а проведение исследований на модели в процессе проектирования называют вычислительным экспериментом. Такое деление удобно для проектировщиков и функционально вполне обосновано, поэтому в дальнейшем будем придерживаться этой терминологии [2, 3, 4].

Выполнение эксперимента на реальных объектах или на физических моделях трудоемко, поэтому стремятся разработать математические модели с использованием результатов более простых экспериментов. Например, испытание дождевального аппарата полнополевым методом предусматривает установку дождемеров во всей зоне дождевания на метровых квадратах. Аппарат включают на определенное время и взвешивают количество воды в

каждом дождемере. По матрице интенсивностей орошения строят изогиеты, моделируют работу смежных аппаратов, выполняют суммирование интенсивностей, выбирают оптимальное расположение аппаратов. Ручное выполнение этих операций не только трудоемко, но и связано с возникновением ошибок.

Более простое и более эффективное решение состоит в применении радиального метода испытания аппарата кругового действия. Дождемеры при этом располагают по одному радиусу в зоне орошения, определяют количество воды в них. Далее все операции выполняют методом математического моделирования. Получают интерполяционную зависимость интенсивности орошения от радиуса. Моделируют работу смежных аппаратов. Формируют матрицу координат и интенсивностей имитируемых дождемеров по схеме полнополевого эксперимента. Моделируют суммирование интенсивностей в зоне перекрытия. Вычисляют показатели равномерности орошения.

Моделирование работы смежных аппаратов выполняется в зависимости от типа машины или дождевальной системы. ГОСТ ИСО 7749-2-2004 [5] рекомендует оценивать равномерность дождевания четырьмя смежными аппаратами, расположенными в углах квадрата. Этим моделируется работа стационарной системы или машины периодического поступательного перемещения.

В данной монографии приведены программы моделирования работы аппаратов, испытанных радиальным методом, на стационарных системах, на машинах непрерывного поступательного и вращательного движения.

Значительная часть монографии содержит описания и программы моделирования и оптимизации различных типов аппаратов и машин для дождевания.

Методика составления и исследования математических моделей распределения жидкостей может быть использована для моделирования и оптимизации процессов распределения жидких пестицидов и удобрений.

Монография представляет интерес для научных работников, конструкторов, студентов, магистров и аспирантов, занятых проектированием и оптимизацией машин для дождевания сельскохозяйственных культур.

Авторы благодарят работников кафедры и института, оказавших содействие в выполнении, редактировании и издании монографии.

# 1. МАШИНЫ ДЛЯ ОРОШЕНИЯ

## 1.1. Способы орошения

Орошением регулируют водный и тепловой режимы почвы, вносят растворы удобрений, удаляют из почвы избыток солей, а затоплением площадей уничтожают вредителей растений и грызунов. Урожаи на орошаемых землях в 3–5 раз выше, чем на неорошаемых.

Для подачи воды на полях строят оросительную систему (рисунок 1.1), включающую в себя источник водоснабжения, водозаборное сооружение с насосной установкой, транспортирующие, распределительные и рабочие каналы или трубопроводы. На полях сооружают закрытые или открытые оросительные сети. В закрытой сети воду под напором подают через трубопроводы и гидранты к поливным машинам или установкам [6]. Открытую сеть прокладывают в виде временных трубопроводов, каналов или лотков, из которых вода насосами подается к дождевальным установкам и поливным машинам. Вблизи городов и крупных животноводческих комплексов поля орошают сточными водами, с которыми вносят и удобрения.

Воду подают в почву дождеванием, поверхностным, подпочвенным и капельным поливами.

**Дождевание.** Воду дробят на капли и распределяют над орошаемой площадью в виде дождя. Размер капель не должен превышать 1...2 мм. Интенсивность дождя должна быть не более 0,1...0,2 мм/мин для тяжелых почв, 0,2...0,3 мм/мин для средних суглинков, 0,5...0,8 мм/мин для легких почв. При таких условиях капли дождя не повреждают растения, меньше уплотняют почву и не разрушают почвенные комки, вода успевает впитаться в почву, на поверхности почвы не образуются лужи. Важно равномерно распределить воду по орошаемому полю и обеспечить заданную поливную норму. Одновременно с поливом вносят удобрения.

**Поверхностный полив.** Воду подают по бороздам, полосам или затоплением всей орошаемой площади.

**Подпочвенное орошение.** Воду подают в почву по трубопроводам с отверстиями или по кротовинам, расположенным на глубине 40...50 см. По почвенным капиллярам вода поднимается в верхние слои почвы. Этот способ не рекомендуется применять на песчаных и супесчаных почвах.

**Капельное орошение.** Воду подают по трубам непосредственно к растениям и выпускают каплями непрерывно или с небольшими перерывами. Этот способ орошения дает значительную экономию воды. Капельное орошение распространено при поливе культур защищенного грунта, в садах, виноградниках и ягодниках.

**Микроорошение.** Орошение импульсным дождеванием [8] осуществляется прерывистым выплеском небольших порций воды с помощью специальных дождевальных аппаратов различной конструкции. Выброс воды импульсным аппаратом чередуется с паузами накопления ее в гидроаккумуля-

торе при длительности паузы в 5–10 раз больше продолжительности выброса воды.

В конструкциях аппаратов синхронного импульсного дождевания продолжительность накопления воды в 50–200 раз превышает время выплеска. Значительные перерывы в подаче небольших порций воды позволяют снизить среднюю интенсивность дождя до 0,01…0,002 мм/мин. Это значит, что импульсное дождевание может применяться на любых по водопроницаемости почвах и при больших уклонах практически без образования стока.

Перспективным методом оптимизации водно-теплового режима растений при высоких положительных температурах является аэрозольное орошение (увлажнение) или мелкодисперсное дождевание [9].

Аэрозольное орошение или мелкодисперсное дождевание (МДД) представляет собой дождевание мелкораспыленной водой с целью улучшения микроклимата в приземном слое воздуха, регулирования температурного режима и улучшения водного питания растений. Мелкодисперсное дождевание сопровождается повышением относительной влажности воздуха, сокращает расход влаги на испарение и транспирацию, защищает растения от неблагоприятного воздействия высоких температур в жаркое время. Оптимизация с помощью мелкодисперсного дождевания условий роста и развития растений способствует активизации процесса фотосинтеза и повышению урожайности растений.

Разновидностью МДД является подкроновое дождевание преимущественно садовых и цитрусовых культур с применением микрораспылителей, которые позволяют повысить влажность воздуха до 7% и снизить его температуру на 1…3 °С при незначительных затратах воды.

Мелкодисперсное и подкроновое дождевание обладает рядом конструктивных, технологических и агротехнических преимуществ по сравнению с другими способами полива, главными из которых являются: значительное сокращение расхода поливной воды, меньшая энергоемкость по сравнению с традиционными способами полива. МДД создает благоприятный микро- и фитоклимат за счет регулирования температуры и влажности приземного слоя воздуха при малых расходах оросительной воды на фоне достаточных запасов почвенной влаги.

## 1.2. Основные элементы дождевальных систем

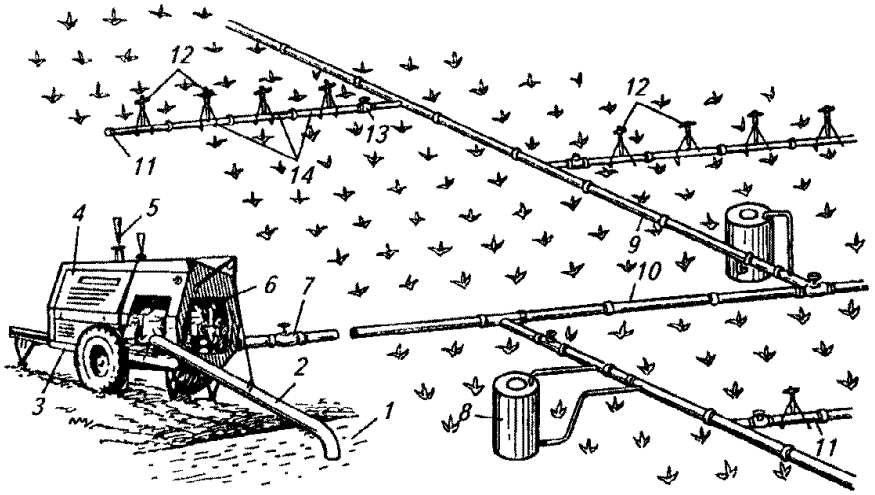
Дождевальные системы состоят [10, 11] из насосных станций, трубопроводов, гидроподкормщиков и устройств для распределения воды по орошаемому полю. К ним относятся дождевальные аппараты, установки и машины.

**Насосные станции** используют для подъема воды от водоисточника (рисунок 1.1) и подачи ее к полям орошения или в водопроводную сеть. Насосные станции бывают стационарные и мобильные (плавучие, передвижные, навесные).

Плавучие станции применяют для забора воды из водоисточников с топкими берегами и резко изменяющимся уровнем воды.

Передвижные и навесные станции широко применяют для работы с дождевальными и поливными машинами. Навесные станции с приводом от ВОМ трактора наиболее маневренны [12].

Насос 6, двигатель 4, всасывающий и нагнетательные трубопроводы, кран 7 и пульт управления передвижной насосной станции СНП-50/80 установлены на одноосном тракторном прицепе, а навесной станции СНП-25/60 – на раме, навешенной на трактор. Насос 6, получая энергию от двигателя 4, преобразует ее в энергию давления воды и обеспечивает определенную подачу.




1 – водоисточник; 2, 9, 10, 11– соответственно всасывающий, распределительный, магистральный и рабочий трубопроводы; 3 – насосная станция; 4 – двигатель; 5 – эжектор; 6 – насос; 7 – кран; 8 – гидроподкормщик; 12 – дождевальные аппараты; 13 – труба с гидрантом; 14 – проходные трубы

Рисунок 1.1 – Схема оросительной системы с быстроразборными трубопроводами

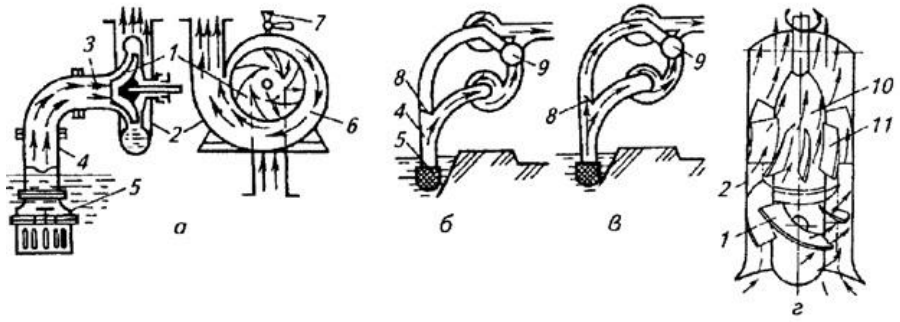
При выборе насосной станции подачу насоса согласуют с расходом воды дождевальной машиной, а давление – с геодезической высотой подъема воды на орошаемый участок. При этом учитывают также гидравлические потери по длине трубопровода и потери на преодоление местных сопротивлений.

По создаваемому давлению насосные станции подразделяют на низконапорные (давление менее 0,25 МПа), средненапорные (0,25...0,5 МПа) и высоконапорные (более 0,5 МПа). Подача и давление зависят от типа насоса. Мобильные станции снабжают в основном центробежными и пропеллерными насосами, на стационарных используют также поршневые, вихревые и струйные насосы. Для привода насосов применяют двигатели внутреннего сгорания и электродвигатели.

Центробежный насос (рисунок 1.2 *о*) состоит из корпуса 2 и рабочего колеса 1 с лопастями. При вращении колеса вода увлекается лопастями во вращательное движение. Под действием центробежной силы вода перемещается по лопастям от центра к периферии. В центре колеса образуется разрежение, и вода из всасывающего трубопровода 4, подводящего канала 3 поступает в корпус насоса. Колесо отбрасывает воду с большой скоростью в отводящий канал 6, где кинетическая энергия преобразуется в статическое давление, обеспечивающее движение воды в нагнетательном трубопроводе.

Различают насосы с двусторонней подводкой воды в корпус (марки Д) и с односторонней подводкой (марки К).

На станциях СНП-50/80, СНП-75/100 и др. установлены двухколесные насосы (рисунок 1.2 *в*, *э*), режим работы которых можно изменять на последовательный (рисунок 1.2 *в*) и параллельный (рисунок 1.2 *э*). При последовательной работе подача снижается, а давление возрастает в 2 раза по сравнению с параллельным режимом. Всасывающий трубопровод и насос перед пуском заполняют водой через кран 7 (рисунок 1.2 *о*) или при помощи газоструйного эжектора 5, установленного на выпускной трубе двигателя (рисунок 1.1).




*О*– центробежного одноколесного; *в*, *э* – двухколесные последовательного и параллельного режимов работы; г – осевого пропеллерного; 1 – колесо; 2 – корпус; 3 – подводящий канал; 4 – всасывающий трубопровод; 5 – фильтр с клапаном; 6 – отводящий канал; 7 – кран; 8 – клапан; 9 – золотник; 10 – выравнивающий аппарат; 11 – направляющие лопасти

Рисунок 1.2 – Схемы насосов

Осевой пропеллерный насос (рисунок 1.2 *г*) состоит из корпуса 2, колеса 1 с винтовыми лопастями и выравнивающего аппарата 10. Лопасти 11 выравнивающего аппарата закреплены на неподвижной втулке. При вращении лопасти колеса 1 перемещают воду вдоль оси корпуса. Пропеллерные насосы применяют на низконапорных станциях. Они обеспечивают большие подачи при малом давлении (0,02...0,10 МПа).

Поршневые и плунжерные насосы применяют для забора воды из глубоких колодцев и подачи ее на большую высоту. Воду в них перемещает поршень, совершающий возвратно-поступательное движение. Подача поршневых насосов не зависит от задаваемого давления.

**Трубопроводы и арматура** необходимы для составления оросительной сети, по которой воду от насосных станций подают к дождевальным машинам, установкам и аппаратам. Трубопровод собирают из алюминиевых или стальных труб длиной 5...9 м, снабженных фланцевым или быстроразъемным соединением (муфтой). По конструкции разъемов различают быстроразборные трубопроводы с шаровым, конусным и цилиндрическим соединениями.

Для уплотнения соединений применяют резиновые манжеты, обеспечивающие автоматическую герметизацию под напором воды и выпуск воды из труб через соединение после отключения насоса. Не нарушая герметизацию, трубы можно присоединять одну к другой несоосно под углом до 15°. Поэтому такие трубопроводы широко применяют в условиях сложного рельефа орошаемых участков.

Промышленность выпускает комплекты разборных трубопроводов с проходным диаметром 102...250 мм, рассчитанных на рабочее давление до 1,2 МПа.

К водопроводной арматуре относятся гидранты-задвижки, колонки, присоединительные устройства, трубы-крестовины, заглушки. Арматуру используют для распределения и регулирования расхода воды в оросительной сети, включения и отключения дождевальных аппаратов.

**Дождевальные аппараты** используют для преобразования струи воды в дождевые капли и распределения их по площади полива [13].

По характеру процесса образования дождя их разделяют на две группы: веерные и струйные.

Первые создают широкий веерообразный поток воды в виде тонкой пленки, которая, встречая сопротивление воздуха, распадается на отдельные капли. Они неподвижны относительно машины или установки и одновременно орошают всю прилегающую к позиции площадь в пределах дальности полета капель, отличаются простотой устройства и получили наименование дождевальных насадок.

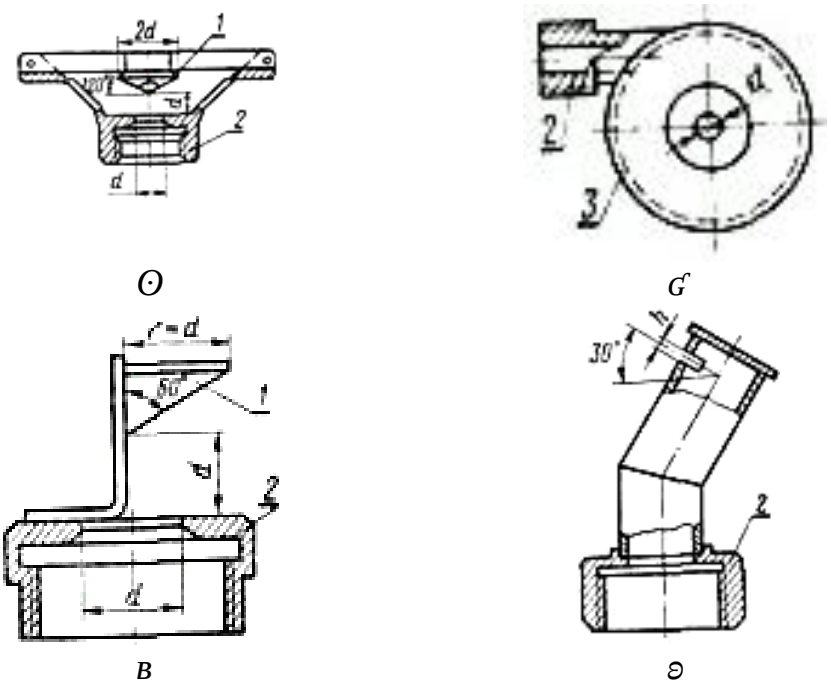
Вторые создают поток воды в виде осесимметричных струй, которые в процессе движения под действием сопротивления воздуха распадаются на отдельные капли. Они одновременно орошают прилегающую к позиции площадь в пределах дальности полета струи в форме сектора. Для орошения площади круга им сообщают вращательное (угловое) движение относительно машины или установки. Струйные рабочие органы с поворотными устройствами сложнее веерных, их называют дождевальными аппаратами.

В зависимости от рабочего напора и дальности полета капель дождя аппараты подразделяют на короткоструйные (давление 0,05...0,15 МПа, дальность полета капель 5...8 м), среднеструйные (давление 0,15...0,5 МПа, дальность полета капель до 35 м) и дальнеструйные (давление более 0,5 МПа, дальность полета капель до 60 м).

Короткоструйные рабочие органы выполняют, как правило, в виде дождевальных насадок. Находят применение дефлекторные, половинчатые, щелевые и центробежные разбрызгивающие насадки.

Дефлекторные насадки (рисунок 1.3 *б*) получили наибольшее распространение. Корпус 2 насадки навинчивают на вертикальный стояк. Струя воды, выходя под напором из отверстия диафрагмы, обтекает дефлектор 1, в результате чего образует пленку воронкообразной формы, которая при дальнейшем движении распадается на капли и орошает прилегающую к насадке круговую площадь. Пленка сходит с дефлектора под углом 30° к горизонту, что обеспечивает максимальную дальность полета образующихся из нее капель. К достоинствам дефлекторных насадок относят сравнительно малый размер капель (0,9...1,1 мм) и небольшой расход энергии на их образование. Однако капли неоднородны по величине, интенсивность их распределения по площади полива также неравномерна. По мере удаления от насадки размер капель возрастает, а интенсивность дождя сначала возрастает, а затем падает. Из-за высокой интенсивности дождя (0,75...1,1 мм/мин) их применение в машинах и установках позиционного действия весьма ограничено. С увеличением напора воды и диаметра выходного отверстия насадки расход и дальность разбрызгивания воды увеличиваются.

Половинчатые (рисунок 1.3 *в*) и щелевые (рисунок 1.3 *э*) насадки применяют, если нужно получить односторонний полив.




*б* *г*

*в* *э*

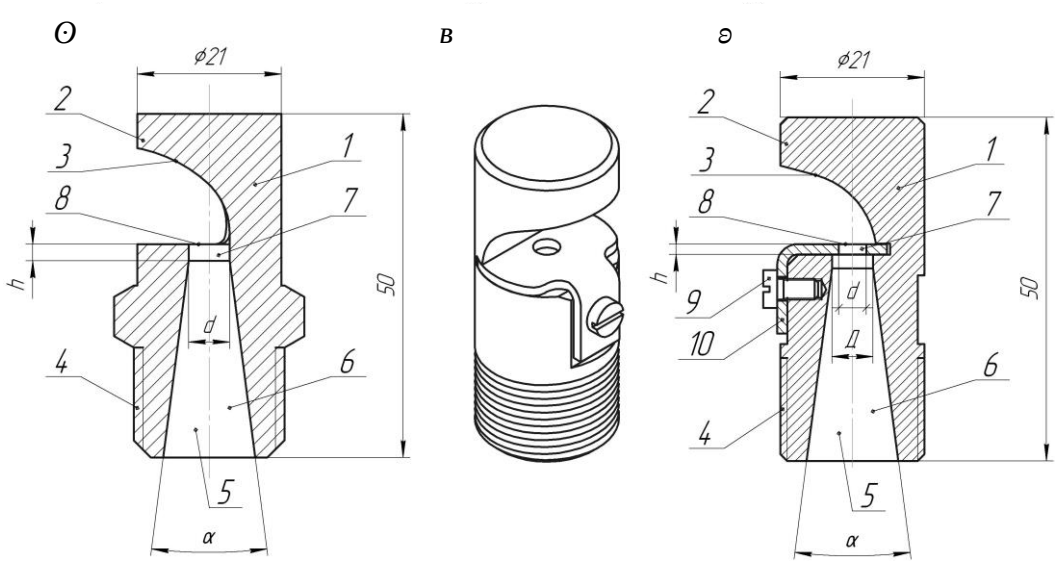
Рисунок 1.3 – Схемы короткоструйных насадок

В половинчатой насадке (рисунок 1.3 *в*) дефлектор 1 имеет форму половины конуса и приварен к отогнутой пластине, которая перегораживает в корпусе 2 половину выходного отверстия. Половинчатая насадка работает аналогично круглой.

Щелевая насадка (рисунок 1.3 *э*) может быть получена путем пропила трубы. Вытекающая из щели вода имеет форму плоской веерообразной пленки. Распадение ее на капли происходит менее интенсивно, чем в дефлекторных насадках, вследствие чего вблизи насадки возникает неорошаемая зона.

Центробежная насадка (рисунок 1.3 *ґ*). Вода в нее поступает через тангенциальный канал корпуса 2, благодаря чему интенсивно закручивается, вовлекаясь в вихревое движение. На выходе из центрального отверстия верхней крышки 3 образуется кольцевой поток со свободным пространством в центре. После выхода из отверстия благодаря тангенциальным составляющим скорости поток воды расширяется, образуя тонкую воронкообразную пленку, которая под действием сопротивления воздуха теряет устойчивость и распадается на капли.

Современные дождевальные короткоструйные насадки секторного действия выполняют со сферическим дефлектором и регулируемым съемным соплом (рисунок 1.4 *в, э*), которые являются модернизацией насадки по авторскому свидетельству № 1729603 (рисунок 1.4 *Ѳ*).




*Ѳ*– насадка МДФА «Таврия», авт. свидетельство № 1729603;
*в, э* – короткоструйная насадка секторного действия
со сферическим дефлектором и регулируемым съемным соплом;
1 – корпус; 2 – дефлектор; 3 – сферическая отражательная поверхность;
4 – присоединительный участок; 5 – центральный сквозной канал;
6 – конфузор; 7 *Ѳ*– сопло; 7 *э* – сопло первого уровня; 8 – плоскость
истечения струи в атмосферу; 9 – крепежный винт; 10 – съемное,
регулируемое, высокоточное сопло второго уровня
Рисунок 1.4 – Современные короткоструйные дождевальные насадки
секторного действия

Конструкция насадки по рисунку 1.4 *э* отличается тем, что с целью улучшения расходно-напорной характеристики и повышения равномерности распределения образуемого слоя дождя, проходной канал выполнен в форме конического конфузора с центральным углом конусности α = 13–15º и с регулируемым съемным высокоточным (до тысячных миллиметра) соплом второго уровня в плоскости истечения струи в атмосферу, при этом высота сопла не превышает половины его диаметра, то есть $h \le 0{,}5d$.

Эта насадка является менее энергоемкой (коэффициент расхода увеличивается до $\varepsilon$ = 0,95 и более) по сравнению с дождевальными аппаратами, обеспечивает непрерывное образование высокодисперсного мелкокапельного моросящего дождя, что приводит к улучшению качества полива. За счет уменьшения диаметра капли дождя в 1,8–2,1 раза уменьшается в 4–5 раз сила ударного воздействия капель дождя на почву и растения, что повышает экологическую безопасность технологического процесса полива, особенно при поливе рассады и всходов на мелкоструктурированных почвах.

Короткоструйные насадки (рисунок 1.5 *б*) образуют мелкокапельный дождь (размер капель 0,8...1,1 мм). Расход воды через насадки (0,34...3,8 л/с) регулируют, изменяя диаметр сопла и давление в трубопроводе.

Средне- и дальнеструйные аппараты образуют поток воды в виде симметричной струи, выбрасываемой из сопла под утлом к горизонту. В полете струя распадается на капли, которые в виде дождя орошают площадь в пределах дальности струи.

Для более равномерного распределения воды вдоль струи средне- и дальнеструйные аппараты снабжают одним или двумя дополнительными соплами. Корпус большинства аппаратов во время работы вращается и орошает площадь в виде круга или сектора, радиус которого равен дальности полета струи. Аппараты поворачивают за счет энергии струи воды, воздействующей на специальный привод механизма вращения.

Среднеструйный аппарат «Роса-3» (рисунок 1.5 *в*) снабжен корпусом 4 с тремя водопроводящими каналами, коромысловым механизмом вращения и механизмом секторного полива [14]. Патрубок 13 ввертывают в поливной трубопровод. Стакан 12 впрессован в корпус и вращается внутри патрубка. Коромысло 6, вращающееся на оси, снабжено лопаткой-рассекателем 8 и возвратной пружиной 5. Из трубопровода вода проходит через три канала со сменными соплами 7, 9 и 11. Струя, выходящая из верхнего сопла, ударяет в лопатку коромысла и поворачивает его на угол 30...90° против хода часовой стрелки, закручивая возвратную пружину 5. При обратном движении коромысло под действием возвратной пружины и воздействием струи на рассекатель ударяет по корпусу 4 и он поворачивается на угол 2...3° (по ходу часовой стрелки). Затем струя, минуя рассекатель, вновь попадает на лопатку, и цикл повторяется. Один оборот аппарат выполняет за 2...4 мин. Скорость вращения регулируют, закручивая возвратную пружину.

Для полива по сектору аппарат снабжен механизмом, обеспечивающим возвратно-вращательное движение корпуса по части окружности. Угол сектора полива (в пределах 45...360°) и его направление можно изменять. Рабочее давление 0,2...0,6 МПа, расход воды 2,5...9,5 л/с, радиус полива 23...35 м.

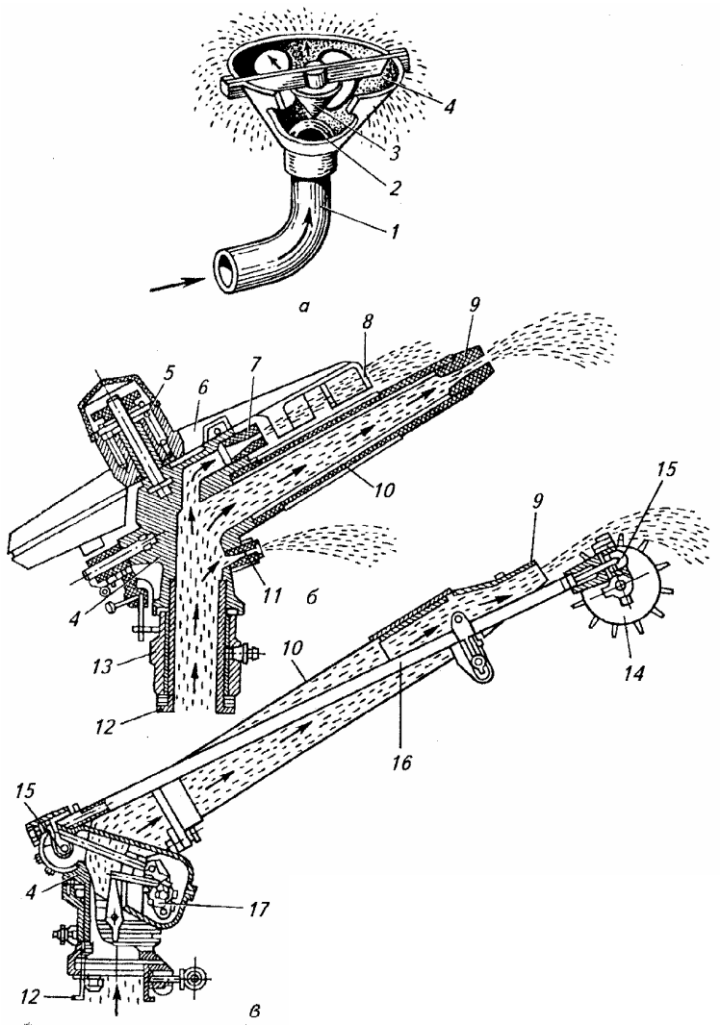
Аппарат «Роса-2» устроен аналогично аппарату «Роса-3». Он поливает по кругу и по сектору радиусом 15...28 м, расход воды 1...3,4 л/с.

Одноствольный аппарат «Роса-1» поливает только по кругу радиусом 13...21 м, расход воды 0,45...1,25 л/с.

Дальнеструйный дождевальный аппарат ДД-30 (рисунок 1.5 *э*) снабжен турбинкой 14, лопатки которой частично введены в струю воды. Под давле-

нием воды турбинка вращается с частотой до 5000 мин$^{-1}$ и через червячные передачи 15, вал 16 и механизм 17 перемещает ствол 10 по кругу. Скорость вращения ствола регулируют, изменяя размер входа лопаток турбинки в струю. Лопатки отсекают часть струи у выхода ее из сопла 9 и обеспечивают более равномерное распределение дождя вдоль струи. Аппарат можно переключать на секторный полив с помощью упоров, переставляя которые, изменяют угол поворота ствола.

Для изменения расхода воды в пределах 15...30 л/с аппарат снабжен сменными соплами диаметром 26, 30 и 34 мм. Рабочее давление аппарата 0,5...0,7 МПа, радиус полива 40...60 м.




*Ѳ*– короткоструйный; *в* – среднеструйный «Роса-3»;
*ə* – дальнеструйный ДД-30;
1 – труба; 2, 7, 9, 11 – сопла; 3 –дефлектор; 4 – корпус; 5 – пружина;
6 – коромысло; 8 –лопатка-рассекатель; 10 – ствол; 12 – стакан;
13 – патрубок; 14 – турбинка; 15 – передача; 16 – вал; 17 – механизм поворота
Рисунок 1.5 – Типы дождевальных аппаратов

Аппарат ДД-15 в отличие от ДД-30 имеет меньшие диаметры ствола и сменных сопел (14, 20 и 26 мм). Расход воды 5...15 л/с, давление 0,5...0,7 МПа, радиус действия 30...50 м.

Аппараты ДД-50 и ДД-80 снабжены дополнительным соплом для привода турбинки. У аппарата ДД-50 расход воды 38...55 л/с, давление 0,5...0,6 МПа, радиус действия 44...56 м; у аппарата ДД-80 соответственно 55...85 л/с, 0,5...0,7 МПа и 58...60 м. Аппараты ДД-15, ДД-30, ДД-50 и ДД-80 устанавливают на гидрантах закрытых оросительных сетей.

Таблица 1.1 – Технические характеристики дождевальных аппаратов

| Показатели | Роса-1 | Роса-2 | Роса-3 | ДД-15 | ДД-30 | ДД-50 | ДД-80 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Характер работы аппарата | полив по кругу | полив по кругу и сектору | | | | | |
| Радиус полива, м | 13...21 | 15...28 | 23...35 | 45...55 | 40...60 | 55...65 | 65...75 |
| Площадь полива, $м^2$ | 144...598 | 289...1085 | 900...1760 | 95 | 154 | 176 | 210 |
| Расход воды, л/с | 0.45...1,25 | 1,0...3,4 | 2,5...9,5 | 5...15 | 15...30 | 30...50 | 50...80 |
| Давление, мПа | 0,2...0,5 | 0,2...0,5 | 0,25...0,6 | 0,49...0,68 | 0,49..0,68 | 0,49...0,68 | 0,49...0,68 |
| Средняя интенсивность дождя, мм/мин | 0,112...0,284 | 0,189...0,273 | 0,157...0,292 | 0,3 | 0,3 | 0.3 | 0,3 |
| Частота вращения, $мин^{-1}$ | 0,5...1,0 | 0,25...0,5 | 0,25...0,5 | | | | |
| Диаметр сопл, мм: | | | | | | | |
| основных | 6; 7; 8 | 5; 7; 8; 9 | 10; 12; 14; 16; 18 | | 26; 30; 34 | 32; 36; 40 | 40; 46; 52 |
| вспомогательных | - | 7,4 | 7,4 | | | 16 | 16 |
| Габаритные размеры, мм | | | | | | | |
| | | | | | 1050 | 1470 | 1520 |
| | | | | | 210 | 265 | 265 |
| | | | | | 765 | 1050 | 1050 |
| Масса, кг | 0,81 | 1,45 | 2,2 | | 16,0 | 27,0 | 27,9 |

**Дождеватель Senninger i-Wob** (рисунок 1.6) по рекламе фирмы [15] является самым прогрессивным из предлагаемых для систем орошения кругового и линейного типа. Используемое в конструкции уникальное вращательное действие наряду с геометрией канавок обеспечивает постоянный размер капель и исключительную равномерность орошения на большой площади охвата. Такая конструкция имеет очевидное преимущество благодаря предотвращению сноса капель ветром и мягкому, как при обычном дожде, воздействию капель на почву. В отличие от других дождевателей i-Wob не разрушает структуру почвы и не допускает избыточного полива.

Равномерность распределения воды по радиусам достигается тем, что распределяющий блок совершает сложное движение. Он вращается вокруг отклоненной от вертикали оси, которая тоже вращается вокруг вертикальной оси. Дождеватель дает шесть или девять струй, которые выходят под разными углами к горизонту и имеют различную дальность полета капель. Так как

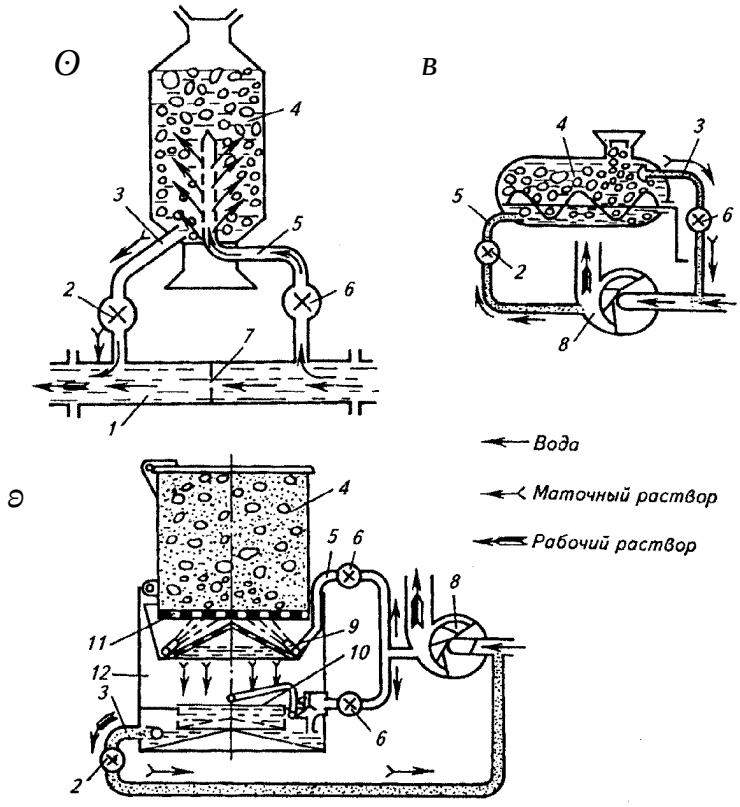
через радиус с дождемерами проходят все струи, то распределение по радиусу более равномерное.



Рисунок 1.6 – Дождеватель Senninger i-Wob

Гидроподкормщики предназначены для приготовления растворов минеральных удобрений и внесения их на поля одновременно с поливом.

Гидроподкормщик ГПД-50 с проточно-напорной системой включают в магистраль распределительного трубопровода 9 (рисунок 1.1) при помощи трубы 1 (рисунок 1.7 *а*) с диафрагмой 7. Трубу соединяют с баком 4, подводящим 5 и отводящим 3 рукавами, перекрываемыми регулировочными вентилями 2 и 6. Удобрения засыпают в бак 4 через горловину, закрываемую крышкой. Вода по рукаву 5 поступает в бак и растворяет удобрения.




*а*– проточно-напорный; *в* – всасывающе-нагнетательный;
*г* – с размывателем; 1 – труба; 2, 6 – вентили; 3, 5 – рукава; 4 – бак;
7 – диафрагма; 8 – насос; 9 – распылители; 10 – поплавок; 11 – сетчатое дно;
12 – бак-смеситель

Рисунок 1.7 – Схемы гидроподкормщиков

Раствор из бака выходит по отводящему рукаву 3 в распределительный трубопровод и смешивается с водой. Подачу раствора регулируют вентилями 2 и 6. Вместимость бака 65 л. Масса загружаемых удобрений 70 кг. Гидроподкормщик используют с дождевальными установками КИ-25, КИ-50 и ДКШ-64 «Волжанка».

Гидроподкормщик с всасывающе-нагнетательной системой (рисунок 1.7 *в*) используют с дальнеструйными дождевателями. Из нагнетательной магистрали часть потока воды по рукаву 5 поступает в бак 4. Вода растворяет удобрения, засыпанные в бак, и образует маточный раствор. По отводному рукаву 3 раствор поступает в насос 8, смешивается с основным потоком воды, а затем дождевальными аппаратами распределяется по орошаемой площади. Вместимость бака 107 л.

Гидроподкормщик с размывателем (рисунок 1.7 *э*) устанавливают на дождевальных агрегатах ДДА-100МА. Удобрения засыпают в верхний бак 4 с сетчатым дном 11. Вода под давлением поступает по рукаву 5 к распылителям 9 и размывает нижний слой удобрений. Образующийся раствор стекает в нижний бак-смеситель 12, смешивается с чистой водой и по рукаву 3 поступает во всасывающую магистраль насоса 8. Здесь раствор дополнительно смешивается с водой и подается в напорную магистраль агрегата. Уровень воды в нижнем баке-смесителе 12 поддерживает поплавок 10 с запорным клапаном. Вместимость бака 120 л.

### 1.3. Дождевальные установки и машины

Полив дождеванием выполняют шланговыми дождевальными установками, машинами и агрегатами [16].

**Шланговый дождеватель ДШ-10** предназначен для полива овощных, кормовых и технических культур, а также плодово-ягодных насаждений. Дождеватель включает в себя приводную станцию и два передвижных дождевальных аппарата.

Приводная станция состоит из одноосного шасси, двух барабанов, гидродвигателей, узла присоединения и механизмов управления. На каждый барабан намотан гибкий несминаемый трубопровод длиной 250 м, диаметром 75 мм. Свободный конец трубопровода прикреплен к передвижному аппарату, смонтированному на колесном ходу.

Перед поливом приводную станцию и оба дождевальных аппарата перемещают трактором и устанавливают в рабочую позицию: станцию вблизи гидранта, дождевальные аппараты на расстоянии 250 м от станции с обеих ее сторон. Одновременно с перемещением аппаратов разматывают трубопроводы на полную длину и укладывают на поле. Станцию подключают к гидранту и включают подачу воды в трубопроводы. Одновременно с поступлением воды к дождевальным аппаратам подключаются гидродвигатели, обеспечи-

вающие медленное вращение барабанов, наматывание трубопроводов и перемещение дождевальных аппаратов. При подходе аппаратов к приводной станции срабатывает система автоматики и вода прекращает поступать, дождевальные аппараты останавливаются вблизи станции.

Скорость перемещения дождевателей 5...15,6 м/ч. Норму полива до 600 м$^3$/га регулируют механизмом управления. После полива полосы (50×500 м) установку перемещают к следующему гидранту. Одним трактором обслуживают шесть установок ДШ-10. Рабочее давление на входе 0,8 МПа, расход воды 17,8 л/с, интенсивность дождя 1 мм/мин.

**Шланговый дождеватель ДШ-1** (рисунок 1.8) предназначен для орошения овощных культур и ягодников на участке площадью до 1 га. Он состоит из рамы с салазками, барабана, гидропривода, карусельного дождевального аппарата и шланга длиной до 30 м. Дождеватель питается от оросительной сети или бытового насоса, подающих воду в шланг под давлением 0,2...0,35 МПа. Машина может работать в двух режимах: позиционно или в движении.



Техническая характеристика дождевателя ДШ-1

| | |
|---|---|
| Давление на гидранте, МПа | 0,3 |
| Расход воды (максимальный), л/с | 1,0 |
| Площадь орошения с одной позиции, га | 0,7 |
| Ширина междурядья, м | 0,7…0,8 |
| Масса дождевателя без шланга, кг | 19 |

Рисунок 1.8 – Общий вид и техническая характеристика дождевателя ДШ-1

Перед поливом дождеватель перемещают на расстояние 30 м от гидранта (или насоса), разматывают шланг и присоединяют его конец к гидранту. Вода поступает к дождевальному аппарату и гидродвигателю, который вращает барабан и перемещает салазки со скоростью до 0,1 м/мин. Дождеватель распределяет воду на ширину 15...20 м. Расход воды 0,4...0,8 л/с.

**Шланговые дождеватели «Агрос-32» и «Агрос-75»**, предназначенные для орошения небольших участков сельскохозяйственных культур, садов, парков, стадионов, состоят из двухколесной тележки, барабана и дождевального аппарата, смонтированного на салазках. Дождеватели работают позици-

онно, а полив происходит при движении аппарата. Вода в дождевальный аппарат подается от гидранта по шлангу. Под давлением этой воды работает гидропривод, который вращает барабан, наматывает поливной шланг и перемещает дождевальный аппарат.

Время полива в одной позиции 20...30 ч. Рабочая ширина захвата «Агрос-32» и «Агрос-75» составляет соответственно 25 и 50 м, длина орошаемого участка с одной позиции – 100 и 200 м.

**Передвижная дождевальная установка «Кооператор»** предназначена для орошения участков площадью до 0,6 га. Основные ее части: рама с салазками, стояк, вращающийся карусельный дождеватель с короткоструйными насадками, шланг длиной 20 м и соединительная арматура. Установка работает позиционно, карусельный дождеватель приводится во вращение реактивной силой струи от дефлекторных насадок.

Радиус полива 7,5 м, площадь орошаемой поверхности с одной позиции – 175 м$^2$.

Шланговые дождевальные установки получили большое распространение в странах ЕС. Лидером в производстве дождевальных машин является фирма Beinlich (Германия).

**Шланговый дождеватель Primus** (рисунок 1.9) состоит из рамы, опирающейся на два или на четыре колеса.

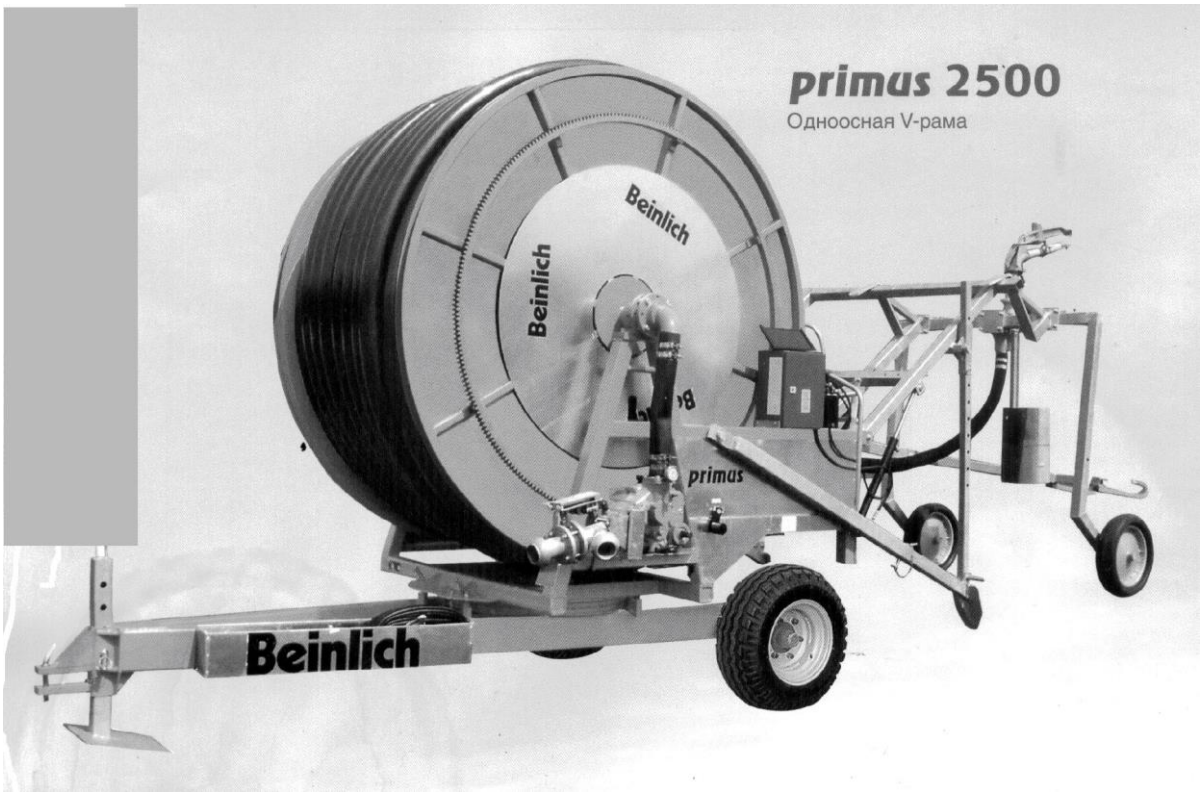



Рисунок 1.9 – Дождевальная установка Primus 2500

На раме установлен барабан с намотанной на него полиэтиленовой трубой. Ороситель опирается на собственные колеса. Привод барабана включает: четырехступенчатый редуктор, высокоэффективную турбину и электровентили. Электроника с солнечной панелью, аккумулятором и девятью программами обеспечивает точность заданной скорости на протяжении всей дистанции и конечное отключение.

Выпускаются различные типоразмеры установок с расходом воды от 4 до 22 л/с. Диаметр полиэтиленовой трубы от 75 до 125 мм, длина трубы от 250 до 500 метров.

Работа с установкой включает следующие операции.

Установку прицепляют к трактору и, с поднятой тележкой оросителя, транспортируют на поле. Колея тележек регулируется в соответствии с междурядьями орошаемой культуры или с технологической колеёй.

Установку отцепляют от трактора. Барабан и тележку оросителя поворачивают вокруг вертикальной оси на 180 градусов. Опускают тележку оросителя и прицепляют её к трактору. Трактором вытягивают трубу на всю длину. Подключают установку к гидранту и включают подачу воды. Далее орошение происходит в автоматическом режиме при постоянной скорости движения. В конце наматывания трубы на барабан установка автоматически выключается.

На тележке оросителя можно устанавливать консоли шириной от 18 до 64 метров и шириной рабочего орошения до 72 метров.

Представительство фирмы работает в Краснодарском крае, г. Гулькевичи.

**Дождевальная машина шлангового барабанного типа Opti Rain 110TG300 модели ST-5** (таблица 1.2) предназначена для полива способом дождевания сельскохозяйственных культур, включая сады и виноградники. Орошение сельскохозяйственных культур выполняется в движении, питание водой – из гидрантов закрытой оросительной сети.

Основные составные элементы конструкции дождевальной машины – рама, барабан с полиэтиленовым армированным шлангом и поворотным механизмом, гидравлическая турбина с приводом, устройство для укладки шланга, механизм фиксирования машины на позиции, присоединительные рукава, тележка с дождевальной фермой или дождевальным аппаратом [10, 16].

Из гидранта оросительной сети, на которую установлена через присоединительный рукав машина, вода подается через гидротурбину в шланг, соединенный с дождевальной фермой или дальнеструйным дождевальным аппаратом. Через дождевальные дефлекторные насадки секторного действия фермы или сопло дождевального аппарата вода распределяется по оросительному массиву. Проходя через гидротурбину, вода вращает вал рабочего колеса турбины, который, в свою очередь, с помощью ременной передачи

начинает вращать входной вал коробки передач. Выходной вал коробки через шестерню вращает барабан дождевальной машины.

Таблица 1.2 – Техническая характеристика дождевальной машины Opti Rain 110TG300 модели ST-5

| **Тип машины** | **Дождевальная машина шлангового барабанного типа** |
|---|---|
| Привод передвижения дождевальной фермы | Гидротурбина, за счет намотки шланга на барабан |
| Расход воды, л/с | 8,23 |
| Давление воды, Мпа: | |
| - на входе в машину | 0,17 |
| - на входе в ферму | 0,14 |
| Производительность выполнения технологического процесса при хозяйственной поливочной норме 215 $м^3$/га за час времени, га: | |
| - основного | 0,14 |
| - переменного | 0,13 |
| Режим передвижения дождевальной фермы | Непрерывный |
| Рабочая скорость дождевальной фермы, м/ч: | |
| - минимальная | 8 |
| - максимальная | 60 |
| Пределы регулирования поливочной нормы, $м^3$/га: | |
| - минимальная | 105 |
| - максимальная | 770 |
| Рабочая ширина захвата, м | 47,6 |
| Слой дождя за проход при скорости 0,5 м/мин, мм | 20,3 |
| Коэффициент распределения слоя дождя: | |
| - эффективного полива | 0,8 |
| -недостаточного | 0,15 |
| -избыточного | 0,05 |
| Средний диаметр капель, мм | 1,5 |
| Габаритные размеры в рабочем состоянии, м: | |
| - длина | 304,1 |
| - ширина | 3,8 |
| - высота | 3,2 |
| Длина водопроводного шланга, м | 300 |
| Диаметр шланга, мм | 110 |

Шланг наматывается на барабан и передвигает тележку по оросительному массиву, обеспечивая тем самым движение дождевальной фермы или аппарата. При достижении тележкой конечной точки он надавливает на ры-

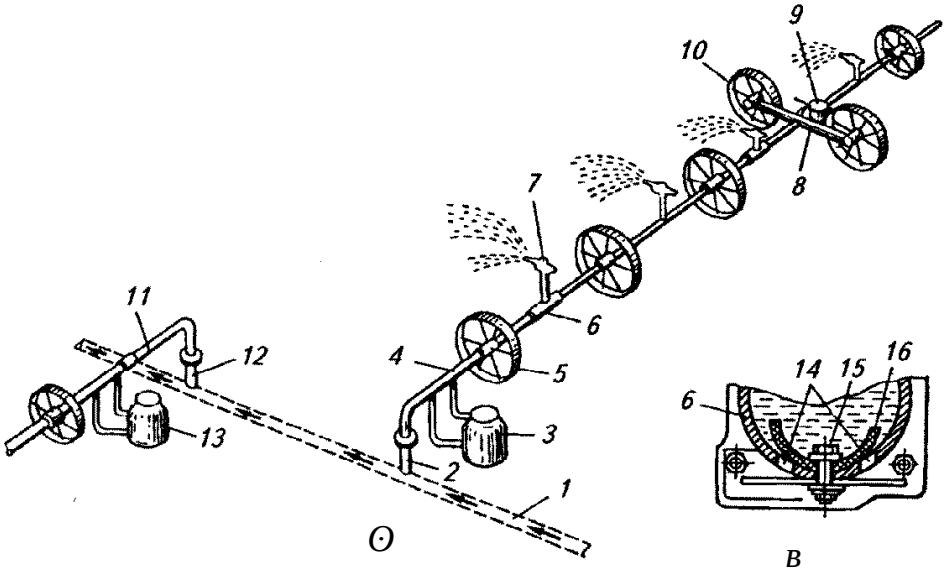
чаг, перекрывающий подачу воды к гидротурбине, движение барабана прекращается.

Скорость движения тележки с дождевальной фермой контролируется спидометром, шкала которого градуирована с учетом изменений диаметра барабана при намотке на него шланга. По результатам испытаний Opti Rain 110 TG300 модели ST 5 можно сделать вывод, что по показателям качества выполнения технологического процесса машина соответствует технологии орошения сельскохозяйственных культур.

Однако следует отметить, что невысокая производительность машины делает ее неэффективной в случае одиночного использования на многоконтурных массивах. Целесообразно одиночное использование машины на мелкоконтурных полях и полях неправильной конфигурации.

Эффективность машины можно повысить за счет группового использования. Для эксплуатации дождевальных машин от местных источников орошения в качестве дополнительной комплектации поставляются насосные станции различной производительности, как с приводом от ВОМ трактора, так и дизельные, которые обеспечивают работу сразу пяти машин.

**Дождевальная машина ДКШ-64 «Волжанка»** предназначена для полива низкостебельных полевых и овощных культур, а также долголетних культурных пастбищ и лугов [17, 18, 19]. Машина имеет два крыла 4 и 11 (рисунок 1.10 *О, в*), которые при поливе монтируют по обе стороны от оросительного трубопровода 7. Полив каждым крылом проводят позиционно с забором воды от гидрантов 2 и 12, расположенных один от другого на расстоянии 18 м.




*О*– общий вид; *в* – сливной клапан;

1, 6 – трубопроводы; 2, 12 – гидранты; 3, 13 – гидроподкормщики; 4, 11 – крылья; 5, 10 – колеса; 7 – дождевальный аппарат; 10 – приводная тележка; 9 – двигатель; 14 – сливные отверстия; 15 – болт; 16 – клапан

Рисунок 1.10 – Схема дождевальной машины ДКШ-64 «Волжанка»

Каждое крыло состоит из водопроводящего трубопровода 6, опорных колес 5, приводной тележки 10 и дождевальных аппаратов 7. Трубопровод собирают из алюминиевых труб длиной 12,6 м, служащих одновременно осью опорных колес 5.

Среднеструйные дождевальные аппараты 7 снабжены механизмами самоустановки и вращения ствола. Механизм самоустановки представляет собой трубчатое шарнирное звено с герметизирующей шайбой и противовесом. При поливе противовесы удерживают аппараты в вертикальном положении. Механизм вращения ствола снабжен качающимся коромыслом с лопаткой. Струя воды, выходящая из сопла аппарата, ударяет в лопатку коромысла и отклоняет его. Возвращаясь в исходное положение, коромысло поворачивает ствол аппарата на угол 3...5°. Диаметр отверстия сопла 7 мм.

На фланце каждой трубы смонтирован сливной клапан 16, состоящий из металлической пластины и резиновой манжеты овальной формы. Манжеты после закрытия задвижки гидранта отходят от отверстий 14 и выпускают воду из трубы. При поливе манжеты перекрывают отверстия 14.

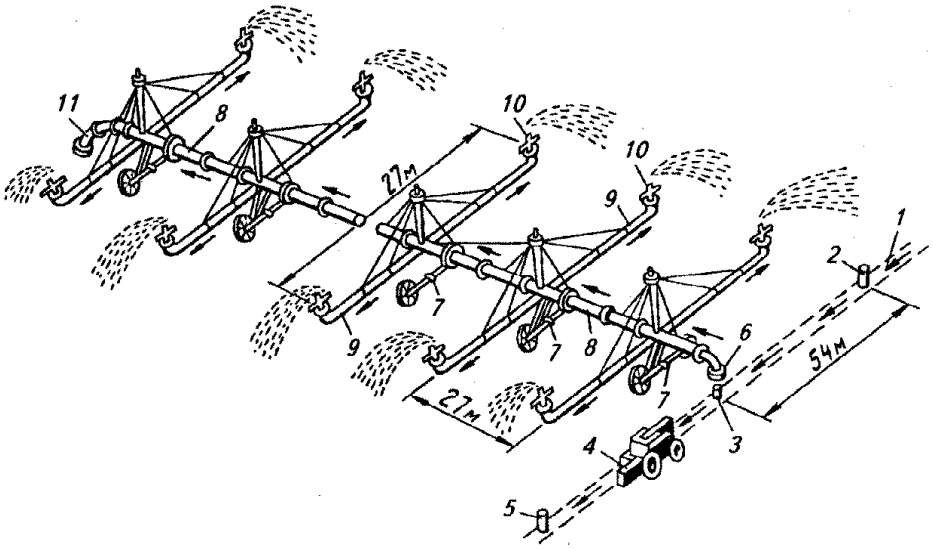
С одной позиции на другую каждое крыло перекатывают при помощи бензинового двигателя 9 мощностью 3 кВт, установленного на тележке крыла. Двигатель 9 приводит в движение ходовые колеса 10 тележки и поливной трубопровод 6.

Рукояткой реверса машину можно останавливать, сообщать ей прямой и обратный ход. Рукоятку включают до пуска двигателя или на малой частоте его вращения, когда сцепление двигателя выключено.

Трубопровод 6 собирают на краю поля против гидранта и подключают к нему гибким рукавом. После выдачи поливной нормы закрывают задвижку гидранта, отсоединяют от него рукав, включают двигатель, первое крыло перекатывают на новую позицию, устанавливают аппараты в вертикальное положение. Заглушив двигатель, трубопровод подключают к следующему гидранту и начинают полив. Второе крыло присоединяют к первому гидранту и включают в работу. Оба крыла поливают одновременно.

Машина поставляется в шести модификациях с крыльями длиной 400, 350, 300, 250, 200 и 150 м. Один оператор обслуживает две-три машины. Интенсивность дождя 0,24 мм/мин.

**Дождевальная машина ДФ-120 «Днепр»** предназначена для полива всех сельскохозяйственных культур, лугов и пастбищ с высотой растений не более 2 м. Полив проводят позиционно от гидрантов 2, 3 и 5 (рисунок 1.11) закрытой оросительной сети, расположенных на расстоянии 54 м [19]. Машина снабжена самоходными тележками-опорами 7, на которые опирается водопроводящий трубопровод 8 с открылками 9, среднеструйными дождевальными аппаратами 10 и заборными устройствами 6 и 11. Открылки и звенья трубопровода имеют стабилизирующие тросовые раскосы и расчалки.




1, 8 – трубопроводы; 2, 3, 5 – гидранты; 4 – электростанция; 6, 11 – заборные устройства; 7 – тележка-опора; 9 – открылки; 10 – дождевальные аппараты

Рисунок 1.11 – Схема дождевальной машины ДФ-120 «Днепр»

Для привода колес на тележках смонтированы электродвигатели с пусковой аппаратурой. Питание электродвигатели получают от электростанции 4 (трактор с навесным генератором).

Трубопровод присоединяют к одному из гидрантов оросительной сети и проводят полив. По окончании полива гидрант 3 закрывают, заборное устройство 6 переводят в транспортное положение, трубопровод освобождают от воды и разъемы питающих кабелей тележек подключают к электростанции.

Машина и трактор перемещаются синхронно к следующему гидранту. Прямолинейность трубопровода обеспечивается механизмом синхронизации движения тележек. Если какая-либо тележка выходит вперед, магнитный пускатель отключает мотор-редуктор и тележка останавливается. При недопустимом изгибе трубопровода на пульте управления гаснет сигнальная лампочка и включается звуковой сигнал.

Расстояние машины от линии гидрантов корректируют, изменяя скорость движения первой и последней тележек кнопками на пульте управления в кабине трактора. Для транспортировки машины с одного поля на другое колеса тележек разворачивают на угол 90°.

При поливной норме 600 м$^3$ /га тракторист-оператор обслуживает 1–4 машины, электрик – 4–8 машин. Производительность машины при поливной норме 300 м$^3$/га составляет 1,4 га/ч. Интенсивность дождя 0,3 мм/мин.

**Самоходная дождевальная машина ДМУ «Фрегат»** (рисунок 1.12) представляет собой движущийся по кругу многоопорный трубопровод 3 (рисунок 1.12 *б*) из стальных труб специального сортамента, установленный на двухколесных тележках 4. Трубопровод присоединяют к стояку 2 гидранта 1, расположенного в центре орошаемого участка. Над гидрантом размещена

неподвижная опора с поворотным коленом, вокруг которого вращается машина [20, 21, 22, 23, 24, 25].

На трубопроводе установлены среднеструйные дождевальные аппараты 6 кругового действия и концевой дальнеструйный аппарат 8 для орошения углов квадратного поля, поливающий по сектору радиусом 25 м.

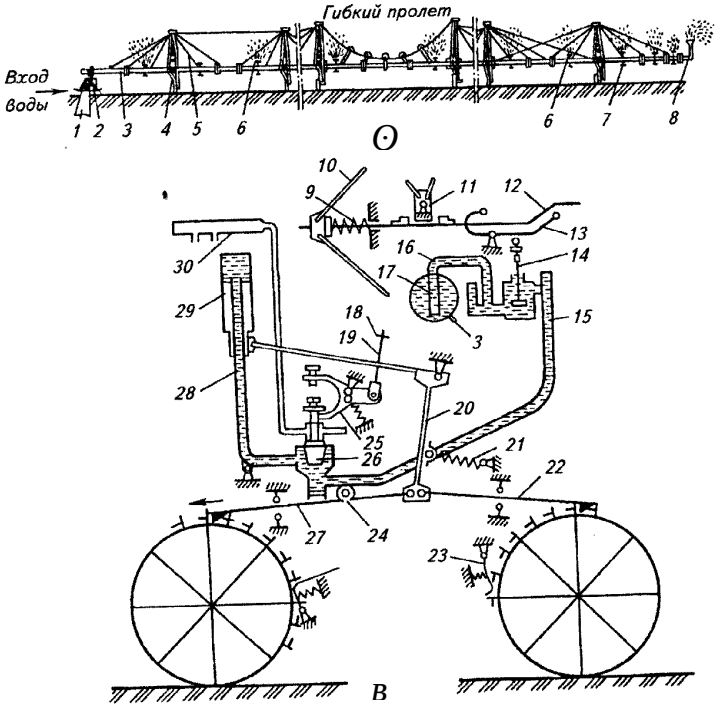
Каждая тележка снабжена гидравлическим приводом (рисунок 1.12 *в*), работающим под давлением оросительной воды следующим образом.

Вода из трубопровода 3 через фильтр 17 и рукав 16 поступает в дроссельный клапан 14, а затем через рукав 75, распределительный клапан 26 и полый шток 28 в гидроцилиндр 29. Так как шток гидроцилиндра закреплен на раме, а цилиндр свободен, то он под давлением воды поднимается вверх. К цилиндру присоединен рычаг 20, противоположный конец которого связан с передним 27 и задним 22 толкателями колес, которые упорами захватывают шпоры и вращают колеса.

Тяга переключения 19, скользящая внутри верхней части рычага 20, соединена вилкой распределительного клапана с рычагом 25. Рычаг 20 нажимает на штырь 18 тяги, она поднимается и поворачивает рычаг 25, который через шток воздействует на клапан 26 и опускает его. Последний перекрывает подачу воды в гидроцилиндр и открывает сливное отверстие. Под действием возвратной пружины 21 и собственной массы гидроцилиндр опускается и выталкивает воду на слив в трубу 30. Толкатели колес отходят назад и входят в зацепление со следующими почвозацепами. Достигнув вилки на тяге, рычаг 20 нажимает на нее, поворачивает рычаг 25, который, захватив буртик штока, открывает клапан и закрывает сливное отверстие. Вода поступает в гидроцилиндр, и цикл повторяется.

Тележки, находясь на неодинаковых расстояниях от центра вращения, движутся с различными скоростями, поэтому каждая из них имеет механизм регулировки скорости. Если одна из тележек отстает, трубопровод изгибается и тянет за собой закрепленные на нем тяги 10, перемещающие стержень 12, который скосом давит на ролик нажимного рычага 13, а тот, в свою очередь, – на шток дроссельного клапана, заставляя клапан 14 опускаться. Проходное отверстие клапана увеличивается, гидроцилиндр быстрее заполняется водой, и скорость тележки возрастает. Это продолжается до тех пор, пока тележка не встанет в одну линию с другими. Когда изгиб трубопроводов выровняется, подача воды войдет в норму. Скорость движения тележки регулируют, изменяя рабочую длину стержня 12.

Частоту вращения машины (0,47...0,11 об/сут.), а следовательно, и поливную норму (240...1250 $м^3$/га) регулируют вручную на последней тележке краном-задатчиком скорости, которым изменяют подачу воды в ее гидропривод. Кран снабжен стрелкой и шкалой. После подачи поливной нормы машину перевозят к следующему гидранту.




*О*– общий вид; *в* – схема гидропривода;
1 – гидрант; 2 – стояк; 3 – трубопровод; 4 – тележка; 5 – трос;
6, 8 – дождевальные аппараты; 7 – сливные клапаны; 9, 21 – пружины;
10, 19 – тяги; 11 – ртутный переключатель; 12 – стержень; 13, 20, 25 – рычаги; 14, 26 – соответственно дроссельный и распределительный клапаны;
15, 16 – рукава; 17 – фильтр; 18 – штырь; 22, 27 – толкатели; 23 – стопор;
24 – сливной кран; 28 – шток; 29 – гидроцилиндр; 30 – сливная труба
Рисунок 1.12 – Схема дождевальной машины ДМУ «Фрегат»

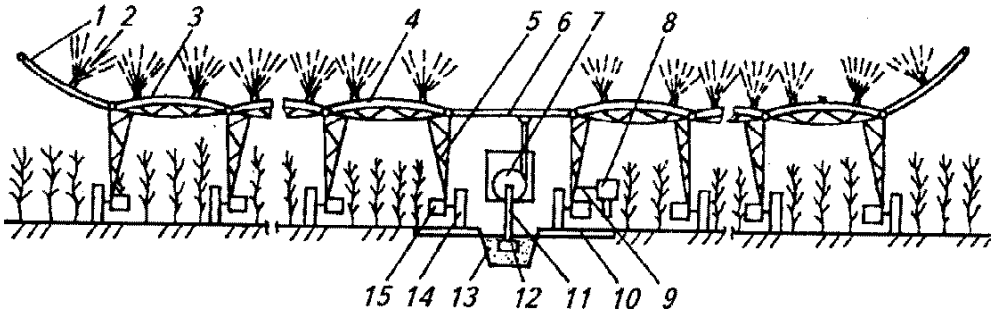
Машину изготовляют в нескольких модификациях с числом опорных тележек 7–16. «Фрегат-1» снабжен трубопроводом диаметром 152,4 мм и гибкими вставками. Его используют на участках с особо сложным рельефом, где разность местных уклонов вдоль трубопровода каждой тележки относительно соседних составляет 0,08...0,22. «Фрегат-2» имеет трубопровод диаметром 177,8 и 152,4 мм без гибких вставок. Его применяют на участках с местным уклоном вдоль трубопровода, не превышающим 0,08.

Машинами «Фрегат» орошают все полевые культуры, луга и пастбища с высотой растений до 2,2 м. Один механик обслуживает 3–4 машины. Машина может быть укомплектована гидроподкормщиком. Интенсивность дождя 0,25 мм/мин [26].

**Дождевальная машина «Кубань»** предназначена для полива зерновых, кормовых, овощных и технических культур, включая высокостебельные, возделываемые на участках со спокойным рельефом [27, 28, 29]. Основные части машины: силовой агрегат 7 (рисунок 1.13) и два дождевальных крыла, составленных из пролетов 3 и 4, опорно-ходовых двухколесных теле-

жек 5 и консолей 1. На раме силового агрегата установлены дизельный двигатель мощностью 158 кВт, электрогенератор, центробежный насос, водозаборник 11 с поплавком 12 и щит управления. Рама агрегата подвешена к центральному трубопроводу 6, закрепленному на стойках двухколесных тележек 5. Для вращения колес 14 на тележках смонтированы мотор-редукторы 15 и приборы стабилизации пролетов один относительно другого (расположены в линию).

На правой тележке установлен прибор 8 стабилизации движения машины по курсу. Прибор взаимодействует с тросом, натянутым вдоль оросительного канала 13, и обеспечивает движение машины по заданному курсу.




1 – консоль; 2 – дождевальный насадок; 3, 4 – пролеты; 5 – опорно-ходовая тележка; 6 – центральный трубопровод; 7 – силовой агрегат; 8 – стабилизатор курса; 9 – стабилизирующий трос; 10 – дорога; 11 – водозаборник; 12 – поплавок; 13 – канал; 14 – колесо; 15 – мотор-редуктор

Рисунок 1.13 – Схема дождевальной машины «Кубань»

На водопроводящих трубопроводах пролетов 3 и 4 и консолей 1 закреплены короткоструйные дождевальные насадки 2 с полусферическим дефлектором, направляющим факел дождя в одну сторону. Насадки с четными номерами ориентируют соплом вперед, а с нечетными – соплом назад относительно оси трубопровода. Орошаемые участки располагают симметрично с обеих сторон оросительного канала. Вдоль канала прокладывают спланированные дороги 10, полотно которых укатывают и уплотняют.

Полив осуществляют при движении машины с забором воды из открытого оросительного канала. Насос засасывает воду через плавучий поплавок 12 и подает в центральный трубопровод 6, а из него в водопроводящие трубопроводы пролетов и консолей. Отсюда вода поступает в 294 насадки и распыливается в виде дождя, средний размер капель которого составляет 1,0...1,03 мм. Интенсивность дождя до 1,3 мм/мин.

Машина обслуживает постоянно один участок шириной 800 м, длиной 1500...2500 м. Полив начинают от середины поля, двигаясь последовательно вперед-назад. На краях поля переключают электропривод на обратный ход.

Норму полива устанавливают, изменяя скорость движения тележек с помощью реле времени, установленного на щите управления. Благодаря автоматике оператор может обслуживать 2–4 машины.

**Двухконсольный дождевальный агрегат ДДА-100ВХ** производства ОАО «Херсонские комбайны» применяют для полива овощных, технических и зерновых культур. Агрегат, двигаясь вдоль оросительного канала, распределяет воду по ширине захвата в виде дождя. Его навешивают на трактор ДТ-75М, снабженный ходоуменьшителем.

Центробежный насос 12 (рисунок 1.14 *в*) засасывает воду через плавучий клапан 2 и подает ее в трубопровод поворотного круга 11 (рисунок 1.14 *б*) и в нижний трубопровод 3 фермы 10. Отсюда вода по открылкам 8 поступает в пятьдесят две короткоструйные и две концевые 9 насадки. Для внесения растворов удобрений к агрегату подключают гидроподкормщик 4.

Центробежный насос 8К-12, смонтированный на картере заднего моста трактора, соединен с приводом.

Ферма 10, составленная из поворотного круга 11, выполненного в виде трубы, и двух консолей, опирается на роликовые опоры рамы 5. К трубе круга присоединяют обратный клапан и напорную линию от насоса. Клапан предотвращает попадание воздуха из трубопровода 3 в насос во время работы эжектора. Вода поступает из трубы круга в трубопровод 3 через четыре патрубка. На трубопроводах 3 установлены сливные клапаны и открылки 8 с короткоструйными насадками.

Насадки расположены симметрично относительно продольной оси консоли с расстоянием 4 м по длине фермы. На панелях с первой по седьмую (считая от круга) насадки имеют диаметр сопла 12 мм (всего 28 насадок), с восьмой по одиннадцатую – 13 мм (16 насадок), на двенадцатой и тринадцатой панелях – 14 мм (8 насадок). Этим обеспечивается одинаковый расход воды (2,3 л/с) каждой насадкой и равномерное распределение ее по орошаемой площади.

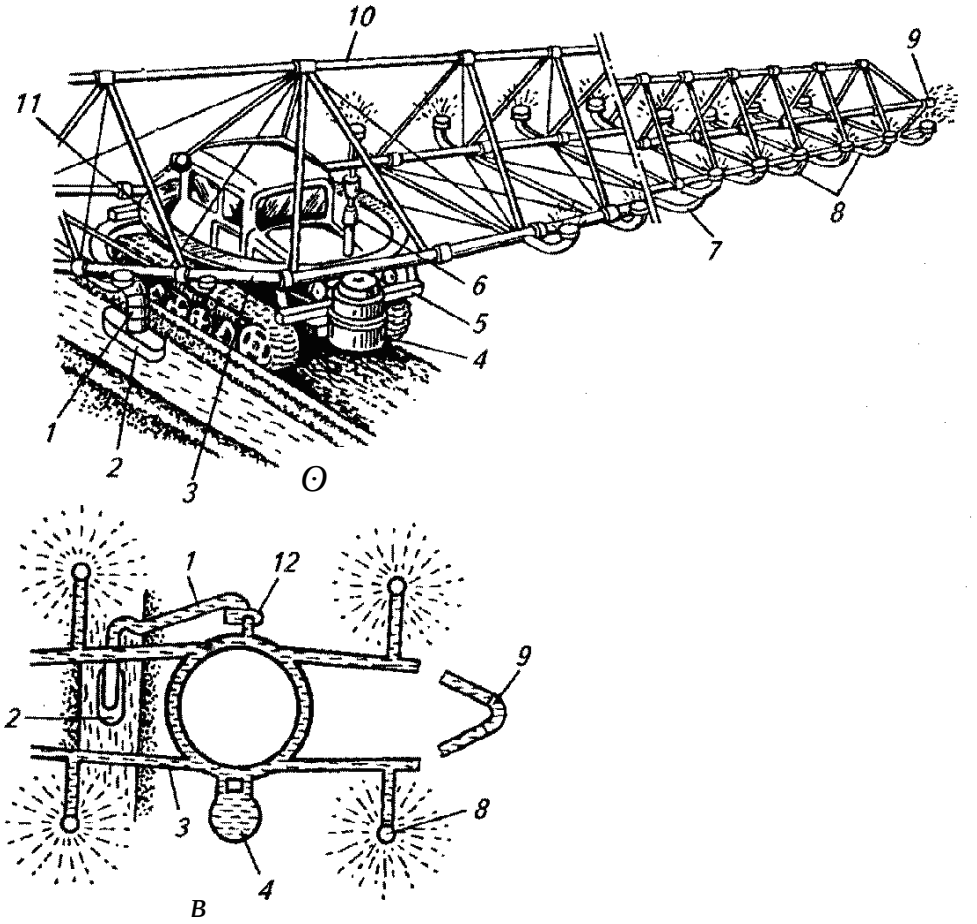
Концевые струйные насадки диаметром 22 мм и с расходом 5 л/с имеют рассекатель, перемещением которого регулируют дальность разбрызгивания.

Для контроля режима работы насоса во время полива на агрегате установлены манометр и вакуумметр. При нормальной работе агрегата стрелка манометра устанавливается на отметке 0,3 МПа, а вакуумметра – 0,03...0,04 МПа. Насос включается из кабины трактора.

Плавучий клапан 2 установлен на всасывающей трубе 1, составленной из двух колен с шарнирными соединительными муфтами. Для герметизации соединений использованы резиновые прокладки. Клапан поднимают в транспортное положение и опускают в рабочее положение гидроцилиндром. Поплавок клапана имеет сетку и полозок, удерживающий сетку над дном канала на расстоянии не менее 10 см. Нормальная глубина погружения сетки 10...15 см,

поэтому наполнение оросителя водой при поливе должно быть не менее 0,4 м.

На всасывающем трубопроводе установлен водомер. Перед пуском агрегата в работу воздух из всасывающей магистрали и насоса откачивают эжектором 6, установленным на выпускной трубе трактора. Ширина захвата агрегата 120 м.




*О*– общий вид; *в* – схема движения воды в ферме;
1 – всасывающая труба; 2 – плавучий клапан; 3 – трубопровод фермы;
4 – гидроподкормщик; 5 – рама; 6 – газоструйный эжектор; 7 – опорная дуга;
8 – открылки с насадками; 9 – концевая насадка; 10 – ферма;
11 – поворотный круг; 12 – насос
Рисунок 1.14 – Дождевальный агрегат ДДА-100ВХ

Для использования ДДА-100ВХ нарезают сеть оросительных каналов длиной от 200 до 1200 м. Поливы проводят по участкам длиной от 100 до 300 м. Участки одновременного полива (бьефы) разделяют перемычками. Слой осадков за один проход агрегата зависит от его рабочей скорости. Если за один проход агрегата выпадает 5 мм осадков (50 м$^3$ на 1 га), то при поливной норме 200 м$^3$/га агрегат должен сделать четыре прохода, при 300 м$^3$/га – шесть и т.д.

Полив целесообразно начинать с головного участка. На следующий участок агрегат можно перевозить в рабочем положении. Если встречаются препятствия, ферму располагают вдоль продольной оси трактора.

Освободив круг от соединений с насосом и опорами, а также от креплений к штокам гидроцилиндров, ферму поворачивают при неподвижном тракторе или поворачивают трактор, удерживая ферму за дуги.

Для полива в ночное время на верхнем поясе фермы устанавливают две фары, освещающие опорные дуги консолей. Дорога для агрегата должна быть предусмотрена вдоль оросителя с правой стороны по течению.

Производительность агрегата при поливной норме 300 м$^3$/га составляет 1,6 га/ч. Интенсивность дождя 4...6 мм/мин.

**Дождевальная установка Monostar BMS-100** производства фирмы Bauer (Австрия).



Рисунок 1.15 – Дождевальная установка Monostar BMS-100

Установка Monostar BMS-100 и агрегат ДДА-100Т являются техническими средствами орошения, работающими в движении, с забором воды из открытых оросителей.

Установка Monostar BMS-100 представляет собой самопередвигающуюся дождевальную ферму, которая состоит из центрального пролета и консоли. Центральный пролет опирается на две опоры – двухколесные тележки, служащие средством передвижения машины. На центральной тележке смонтированы силовой агрегат (дизель-генератор), электронасосный агрегат, всасывающая и напорная линии насоса, система управления установкой, моторные редукторы привода колес тележки.

Дождевальная установка оборудована процессором, с помощью которого задаются параметры рабочего процесса. В конструкции системы управления установки предусмотрены механизмы, с помощью которых осуществляются автоматический пуск и остановка мотор-редукторов; движение по борозде; стабилизация курса движения опорных тележек в линию.

По результатам сравнительных испытаний дождевальной установки Monostar BMS-100 и дождевального агрегата ДДА-100Т (таблица 1.3) можно сделать вывод, что установка Monostar BMS-100 имеет лучшие качественные показатели, оснащена автоматической системой управления и защиты от аварийных ситуаций.

Таблица 1.3 – Технические характеристики дождевальной машины Monostar BMS-100 и агрегата ДДА-100Т

| Дождевальная машина | Monostar BMS-100 | ДДА-100Т |
|---|---|---|
| Тип | Электрическая, двухопорная, самопередвигающаяся, с дождеванием в движении и забором воды из открытых оросителей | Двухконсольный дождевальный агрегат с поливом в движении, фронтальным перемещением, с забором воды из открытых оросителей |
| Привод движения | Электромеханический от мотор-редукторов | Трактор Т-150-G5 |
| Источник энергии | Дизель-генератор | Трактор Т-150-05 |
| Мощность, кВт | 33,0 | 121,5 |
| Общий расход воды, л/с | 34,0 | 120 |
| Давление в насосе, МПа | 0,27 | 0,30 |
| Ширина захвата, м | 102 | 120 |
| Скорость движения (рабочая), м/мин | 0,3–3,9 | 12,0–17,2 (вперед), 16,8 (назад) |
| Средний слой дождя за один проход, мм | 5,0–60,0 | 3,3–4,2 |
| Поливочная норма | 217 | 216 |
| Коэффициент распределения слоя дождя по ширине захвата | | |
| - эффективного полива | 0,69 | 0,61 |
| - недостаточного полива | 0,21 | 0,18 |
| - избыточного полива | 0,10 | 0,21 |
| Средний размер капель, мм | 0,9 | 1,1 |
| Габаритные размеры, м: | | |
| - длина | 5,50 | 5,35 |
| - ширина | 86,00 | 110,30 |
| - высота | 7,00 | 5,00 |
| Количество опорных тележек, шт. | 2 | – |
| Потребляемая мощность от энергетического средства, кВт | 18,1 | 73,6 |
| Расходы горючего, кг/ч | 4,59 | 16,90 |
| Удельный расход горючего при норме полива 200–600 $м^3$/га, кг/га | 7,52–22,6 | 7,82–23,5 |

В установке BMS-100 мобильное изменение позиций может выполняться как на собственной ходовой системе, так и с помощью буксировки другим энергосредством.

За счет меньшего расхода воды дождевальная машина BMS-100 имеет меньшую производительность. Поэтому удельный расход топлива по обеим машинам находится на одном уровне, хотя часовые расходы топлива в установке BMS – 100 меньше, чем в ДДА – 100Т.

**Дальнеструйный навесной дождеватель ДДН-70** применяют для орошения овощных и технических культур, лесных и садовых питомников [30]. Дождеватель навешивают на трактор тягового класса 3. На раме дождевателя установлены центробежный насос 15 (рисунок 1.16 *б*) с редуктором 17, всасывающий трубопровод 14, ствол 6, механизм поворота 9, гидроподкормщик 3 и механизм привода.

Перед поливом на расстоянии 100м один от другого нарезают временные оросительные каналы, из которых центробежный насос 15 подает воду во вращающийся ствол 6 с основным 5 и малым 4 струйными соплами. Струя, выходящая из основного сопла, орошает внешнюю часть круга, из малого – внутреннюю.

Для повышения интенсивности распада струи и равномерности полива вблизи дождевателя малое сопло снабжено разбрызгивающей лопаткой. Интенсивность дождя регулируют, устанавливая сменные насадки основного сопла с диаметром выходных отверстий 55, 45 и 35 мм. Диаметр малого сопла 16 мм.

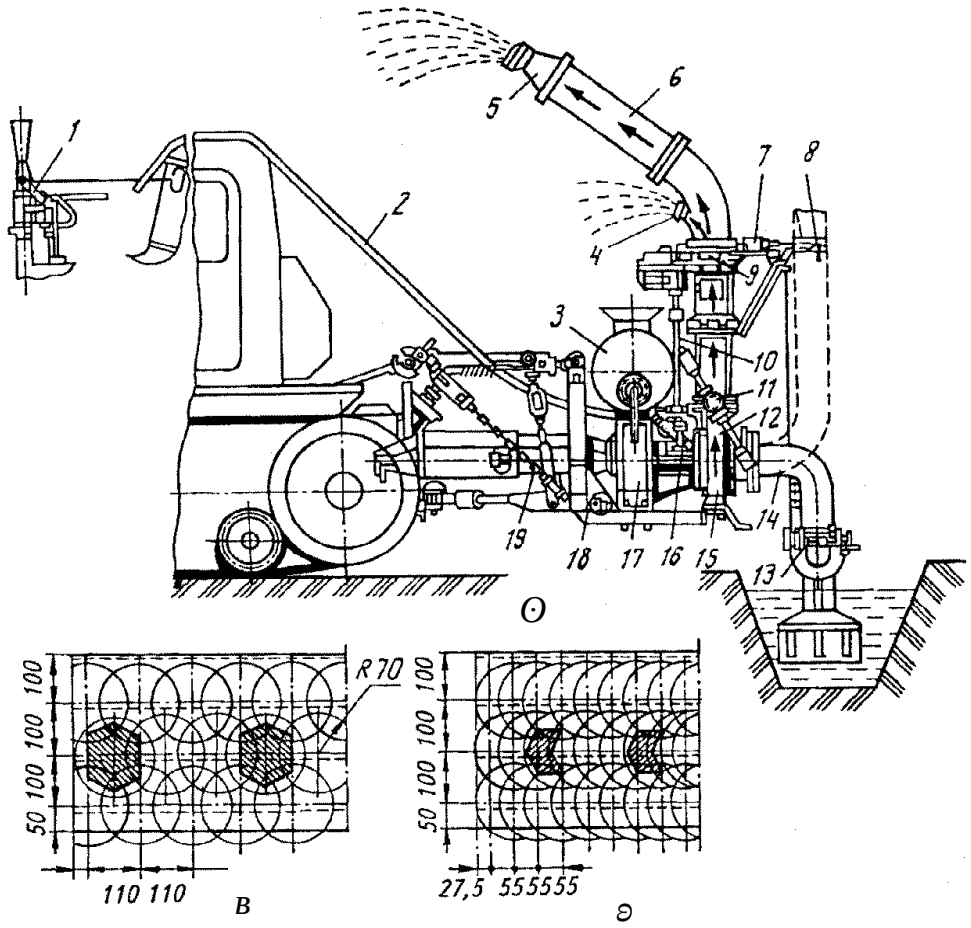
Расход воды измеряют водомерным устройством, цена деления шкалы которого зависит от диаметра насадки.

Механизм поворота ствола включает в себя червячный редуктор 16, шарнирный валик 10, эксцентрик и рычаг. На плече рычага закреплена ось с собачкой и переключателем. Собачка взаимодействует с храповым колесом, напрессованным на стакан, к которому прикреплен ствол 6. При вращении валика 10 рычаг совершает колебательное движение.

Собачка периодически упирается в зуб храпового колеса и поворачивает ствол. При обратном ходе собачки ствол фиксируется тормозом 7 с фрикционной накладкой. Полный оборот ствол совершает за 4,5 мин.

Полив можно выполнять по кругу (рисунок 1.16 *в*) и по сектору (рисунок 1.16 *г*).

Для полива по сектору (рисунок 1.16 *г*) в отверстия фланца ствола вставляют два упора, нажимающие на переключатель, который поворачивает собачку, и ствол вращается в обратную сторону. Переставляя упоры в отверстиях фланца, изменяют угол сектора через каждые 20° в пределах 0...360°. Всасывающий трубопровод 14 переводят в транспортное положение лебедкой 13 и закрепляют хомутом 8.




*а*– общий вид; *в* – полив по кругу; *д* – полив по сектору;
1 – эжектор; 2 – трубопровод эжектора; 3 – гидроподкормщик; 4, 5 – сопла;
6 – ствол; 7 – тормоз; 8 – хомут; 9 – механизм поворота; 10 – валик;
11 – вентиль; 12, 14 – трубопроводы; 13 – лебедка; 15 – насос;
16, 17 – редукторы; 18 – рама; 19 – цепь
Рисунок 1.16 – Дальнеструйный дождеватель ДДН-70
(размеры даны в метрах)

В рабочем положении дождеватель фиксируют цепями 19.

Перед пуском из насоса отсасывают воздух эжектором 1, соединенным трубопроводом 2 с насосом. Далее в канал опускают всасывающий трубопровод, открывают вентиль трубопровода эжектора, закрывают откидные хлопушки сопел и включают эжектор. Заполнив насос водой, дождеватель приводят в движение плавным включением сцепления на малой частоте вращения коленчатого вала.

Бак гидроподкормщика сообщается с напорным и всасывающими каналами насоса трубопроводами с вентилями 7, которыми регулируют количество поступающей и отсасываемой воды. Полив проводят позиционно.

При поливе по кругу (рисунок 1.16 *в*) расстояние между стоянками принимают 110 м. Если скорость ветра превышает 1,5 м/с, то площадь поливают по сектору с расстоянием между стоянками 55 м. Работать начинают с головы канала по течению воды. Для создания необходимой глубины воды в канале и устранения ее сброса устанавливают переносные перемычки: одну вблизи водозаборника, другую у места следующей стоянки дождевателя. Время стоянки на одной позиции зависит от поливной нормы и диаметра сопла.

Производительность агрегата 0,67 га/ч. Его обслуживают тракторист и рабочий.

**Дальнеструйный дождеватель ДДН-100** навешивают на тракторы Т-150К, Т-150, Т-4А и используют для орошения полевых культур, садов, плодо- и лесопитомников, лугов и пастбищ. При необходимости ДДН-100 может работать как насосная станция для подачи воды в распределительную сеть. Машина ДДН-100 унифицирована с дождевателем ДДН-70. Насос приводится в действие от ВОМ трактора через повышающий редуктор. Основное сопло комплектуется сменными насадками диаметром 65, 60, 58, 56 и 54 мм, позволяющими изменять интенсивность дождя и расход воды. Диаметр малого сопла 20 мм. Сопла укомплектованы хлопушками. Частота вращения ствола 0,2 мин$^{-1}$. Вместимость бака гидроподкормщика 107 л.

Расход воды при работе с различными тракторами регулируют, заменяя рабочее колесо насоса. Для Т-150К насос комплектуют колесом диаметром 334 мм (расход 115 л/с), для Т-4А – 320 мм (100 л/с), для ДТ-75М – 305 мм (85 л/с).

ДДН-100 работает позиционно с забором воды из открытой сети или закрытого трубопровода. Поливать можно по кругу и по сектору с расстояниями между каналами открытой сети 120 м (тракторы Т-150К и Т-4А) и 110 м (ДТ-75М). Расстояние между стоянками при круговом поливе 145 м (тракторы Т-150К, Т-4А) и 110 м (ДТ-75М), при поливе по сектору соответственно 72,5 и 55 м.

Для переоборудования ДДН-100 в насосную станцию снимают ствол с механизмом поворота, корпус насоса поворачивают относительно продольной оси против хода часовой стрелки на угол 90°. На напорный патрубок насоса устанавливают задвижку.

Производительность дождевателя при поливной норме 300 м$^3$/га составляет 1,2 га/ч. Обслуживают его тракторист и рабочий-поливальщик.

**Дождевальные машины Valley** производства компании Valmont Irrigation (США).

Отличительная особенность машин «Валлей» заключается в том, что практически каждую машину «Валлей» с помощью компьютерной программы проектируют из отдельных элементов применительно к конкретному объ-

екту (его конфигурации, уклону, почвенным условиям, виду выращиваемых культур, режиму орошения).

Машины «Валлей» могут работать как от собственного дизель-генератора, так и по кабелю от местной электросети.

Воду к дождевальным машинам предполагается подавать от места водозабора, отмеченного на плане. К дождевальным машинам подведены пластмассовые трубопроводы из раструбных труб НПВХ. Для машин длиной 374 м предусмотрен единый трубопровод, вода в который подается двумя насосными станциями при одновременной работе двух машин или одной станции при работе одной из машин.

В состав оборудования входят:

- дождевальные машины с площадками;
- трубы;
- запорно-регулирующая и измерительная арматура;
- насосные станции и площадки для насосов.

Компания Валмонт является одним из лидеров в отрасли механизации орошения. Внедряет наиболее совершенные и эффективные методы орошения. Создает высокотехнологичные устройства дистанционного управления, компьютеризованные панели управления с поддержкой GPS.

Компания производит фронтальные и круговые дождевальные установки (рисунок 1.17). Фронтальные установки (рисунок 1.17 *б*) имеют функцию разворота на 180 градусов относительно последней тележки, чем увеличивается в два раза площадь орошения одной машиной.



Рисунок 1.17 *б*– Фронтальная оросительная установка Valley



Рисунок 1.17 *в* – Круговая оросительная установка Valley

Машина Valley кругового действия (рисунок 1.17 *в*) предназначена для полива дождеванием сельскохозяйственных культур, включая высокосте-

бельные, способом дождевания на оросительных агрофонах с относительно ровным рельефом. Питание водой осуществляется из закрытой оросительной сети, полив – в движении по кругу. Привод передвижения – электромеханический с помощью мотор-редукторов.

Машина представляет собой многоопорную конструкцию в виде фермы с консолью. На конце консоли установлен среднеструйный дождевальный аппарат и подкачивающий насос для увеличения ширины захвата машины.

Таблица 1.4 – Техническая характеристика дождевальной машины Valley

| | |
|---|---|
| Тип машины | Многоопорная, кругового действия, с дождеванием в движении, питанием от закрытой оросительной сети |
| Привод движения | Электромеханический с помощью мотор-редукторов опорных тележек |
| Источник энергии | Дизель-генератор |
| Расход воды, л/с | 105 |
| Рабочая ширина захвата, м | 475 |
| Пределы регулирования поливной нормы, $м^3$/га | 113–1130 |
| Производительность при поливной норме 600 $м^3$/га за один час времени, га: | |
| - основного | 0,67 |
| - переменного | 0,62 |
| Площадь орошения с одной позиции, га | 141,7 |
| Режим движения машины | Старт-стопный |
| Расстояние от поверхности земли до распыляющих насадок, м | 1,5–1,7 |
| Коэффициент эффективного полива | 0,75–0,80 |
| Средний диаметр капель, мм | 1,2 |
| Габаритные размеры, м: | |
| - длина | 5,7 |
| - ширина | 447,5 |
| - высота | 3,55–4,10 |
| Количество опорных тележек, шт. | 8 |
| Удельный расход горючего, кг/га | 2,73 |
| Потребляемая мощность от генератора, кВт | 7,4 |

Центральная тележка оснащена четырьмя пневматическими колесами. Тележка установлена на бетонной основе и закреплена с помощью цепей. В качестве источника энергии использован дизель-генератор. В конструкции опорных тележек предусмотрена возможность установки колес параллельно оси машины с помощью шарнира и фиксирующего пальца для транспортировки машины на другую позицию.

Передвижение осуществляется с помощью буксировочного устройства центральной тележки тракторами мощностью 80 л.с. Основные преимуще-

ства машины – хорошие эксплуатационно-технологические показатели, высокое качество распределения дождя, низкие энергетические и эксплуатационные расходы, полная автоматизация процесса полива, достаточная мобильность при смене позиций.

Использование для подачи воды концевого дождевального аппарата и подкачивающего насоса позволяет избежать расходов на создание дополнительного общего давления воды в машине для его работы. Насос в данном случае работает от электрической сети самой машины.

**Ирригационные машины REINKE (ПИВОТЫ)** компании Reinke (Рейнке), основанной в 1954 году в штате Небраска, США, крупнейшего в мире производителя оросительных установок кругового и фронтального типа.

Машины Reinke используются при выращивании кукурузы, картофеля, зерновых, овощных и фуражных культур, на сахарном тростнике и сахарной свёкле.

Круговые машины (пивоты) могут работать на склонах до 15%. Для полива углов поля может применяться специальное устройство – крыло дополива углов. К примеру, при площади круга в 53 га орошаемую площадь можно увеличить до 63 га (при площади квадрата 64 га). Давление на входе сравнительно низкое – 2,5…3 атм. Круговая машина может применяться на нескольких полях в случае, если она была изготовлена как буксируемая.

Дождевальные машины Reinke могут быть оснащены различными спринклерами (рисунок 1.18) и иметь разные опции их расположения, в зависимости от культуры и фазы ее развития, почвенно-климатических условий и т.д.

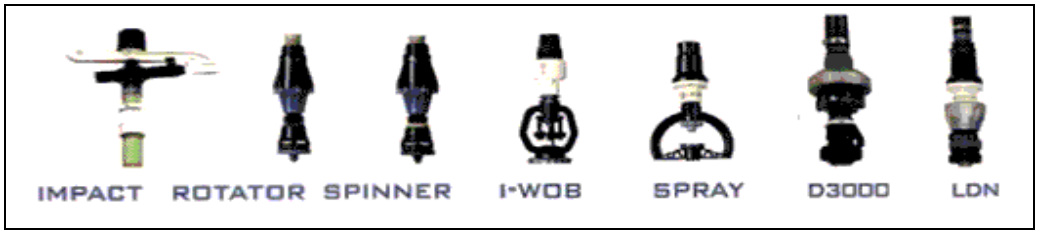



Рисунок 1.18 – Типы спринклеров дождевальных машин Reinke

Конечная секция пивота Reinke может быть различной длины (от 1 до 31 м). При наличии подкачивающего насоса, на последней движущейся опоре находятся контрольный бокс и фильтр-отстойник. Подкачивающий насос (2 л.с. или 5 л.с.) находится непосредственно перед пушкой, для максимальной эффективности. Благодаря конечной пушке можно увеличить орошаемый радиус на 10…40 м в углах поля.

**Дождевальная машина Centerliner 168 CLS** фронтально-кругового перемещения, производства компании BAUER (Австрия) (таблица 1.5).

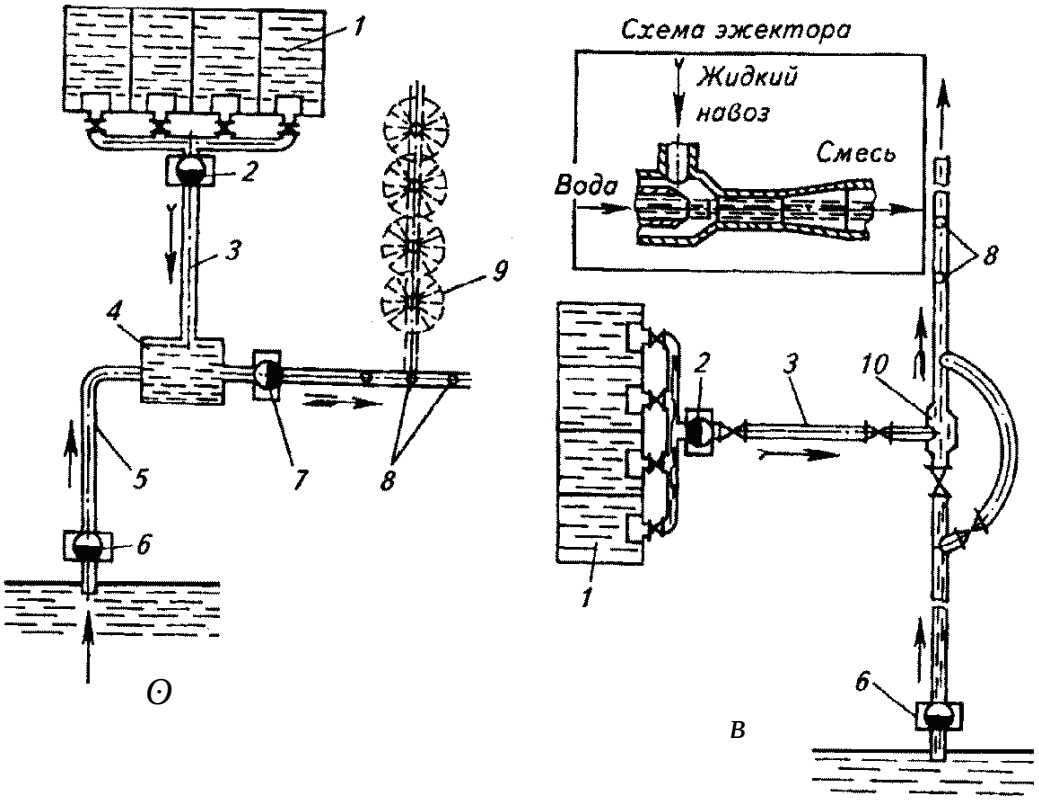
Дождевальная машина фронтально-кругового перемещения предназначена для полива методом дождевания всех сельскохозяйственных культур, включая высокостебельные. Подача воды осуществляется по гибкому шлангу от гидрантов закрытой оросительной сети. Полив растений происходит в движении в фронтальном или круговом режиме. Привод передвижения машины – электромеханический с помощью мотор-редукторов. Работа дождевальной машины осуществляется в автоматическом, старт-стопном режиме с интервалом электрического импульса на электродвигатели мотор-редукторов крайних тележек, приводящие в движение машину. Конструкцией дождевальной машины предусмотрена возможность осуществления полива в круговом режиме. Для этого на главном пульте управления выбирается режим полива по кругу, дождевальные насадки переключаются (в данной модели это делается вручную) на круговой режим, и машина начинает полив при движении опорных тележек вокруг центральной тележки.

Таблица 1.5 – Техническая характеристика дождевальной машины Centerliner 168 CLS

| | |
|---|---|
| Тип машины | Электрическая, колесная, многоопорная, самодвижущаяся, реверсивная, фронтального и кругового перемещения, с питанием водой по гибкому шлангу от гидрантов закрытой оросительной сети |
| Привод движения | Электромеханический с помощью мотор-редукторов опорных тележек |
| Источник энергии | Дизель-генератор |
| Расходы воды, л/с | 64 |
| Рабочая ширина захвата, м | 344,9 |
| Установка таймера, % | 10–100 |
| Средняя рабочая скорость, м/ч (м/мин) | 11–105 (0,18–1,75) |
| Поливная норма за один проход, $м^2$/га | 60–600 |
| Расход топлива, кг/ч | 0,89 |
| Суммарная потребляемая мощность от генератора, кВт | 7,5 |
| Удельный расход горючего, кг/га | 2,32 |
| Удельные энергозатраты, кВт·ч/га | 19,7 |
| Коэффициент использования мощности генератора | 0,55 |
| Габаритные размеры, м: | |
| - длина | 344,9 |
| - ширина | 10,5 |
| - высота | 5,7 |
| Количество опорных тележек, шт. | 6 |

**Внесение жидкого навоза дождевальными машинами** стали использовать с развитием животноводческих комплексов. Различают осветленный (полностью очищенный от взвесей), неосветленный (частично очищенный) и неочищенный жидкий навоз. Осветленный навоз вносят дождевальными машинами, так как полив им не отличается от полива чистой водой. Неосветленные стоки и жидкий навоз вносят специально подготовленными дождевальными системами, машинами и аппаратами.

Жидкий навоз вводят в поливную воду через всасывающую или напорную магистраль насосной станции, обслуживающей оросительную сеть. В первом случае фекальной насосной станцией 2 (рисунок 1.19 *О*) жидкий навоз из накопителя 1 подают в смесительную емкость 4, где он смешивается с водой, поступающей от насосной станции 6, а затем приготовленная смесь насосной станцией 7 нагнетается в распределительный трубопровод дождевальной машины 9. Во втором случае жидкий навоз смешивается с водой в эжекторе 10 (рисунок 1.19 *в*), вмонтированном в распределительный трубопровод. Насосная станция 6 нагнетает в эжектор чистую воду, а насосная станция 2 – жидкий навоз.




*О*– во всасывающий трубопровод; *в* – в напорный трубопровод;
1 – накопитель; 2, 6, 7 – насосные станции; 3, 5 – трубопроводы;
4 – смесительная емкость; 8 – гидранты; 9 – дождевальная машина;
10 – эжектор

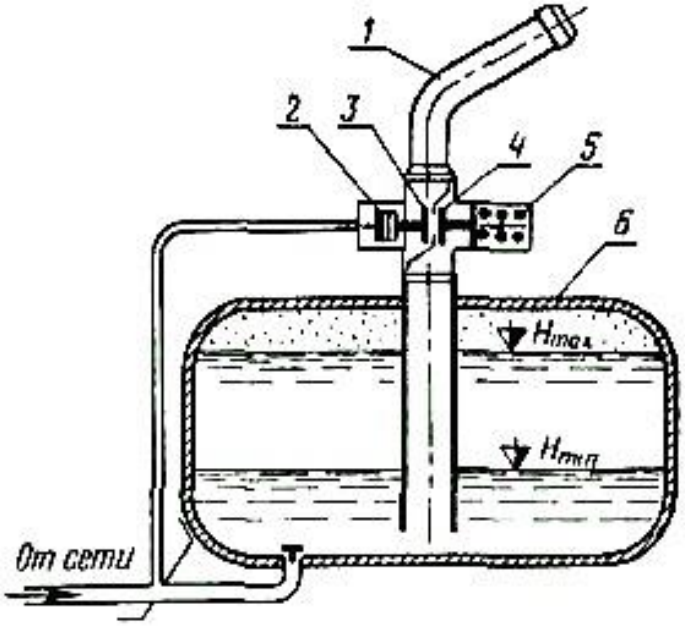
Рисунок 1.19 – Схема ввода жидкого навоза

Животноводческие стоки распределяют по площади орошения машинами ДКН-80, ДФС-120 и агрегатом ДДН-100С.

**Импульсные дождевальные системы** отличаются от обычных тем, что работают в режиме прерывистой (импульсной) подачи воды на орошаемую поверхность поля. Основные элементы такой системы: напорообразующий узел (насосная станция), магистральный, распределительные и оросительные трубопроводы, импульсные дождевальные аппараты. Импульсный дождевальный аппарат («дождевальная пушка») отличается от обычного тем, что его рабочий цикл состоит из двух непрерывно чередующихся периодов: периода накопления воды в аппарате, периода выплеска (выброса) ее под действием сжатого воздуха.

Известны импульсные дождевальные аппараты двух типов: автоколебательного действия; принудительного действия. Первые способны обеспечить лишь такой режим работы, при котором период накопления только в 5–10 раз больше периода выброса воды, вследствие чего расход воды не может быть меньше 0,5...1 л/с.

Аппараты принудительного действия обеспечивают режим работы, при котором период накопления в 50–200 раз больше периода выброса, вследствие чего подводимый расход воды может быть снижен до 0,1 л/с и менее, а средняя интенсивность дождя может находиться в пределах 0,01... 0,002 мм/мин. Наибольшее распространение получили дождевальные аппараты второго типа, работающие в «ждущем режиме» по сигналам понижения давления в трубопроводной сети.




1 – ствол; 2 – поршень; 3 и 4 – клапаны; 5 – пружина;
6 – гидроаккумулятор

Рисунок 1.20 – Схема импульсного дождевального аппарата

Система дождевания с аппаратами принудительного действия, помимо перечисленных выше основных элементов, включает еще и генератор командных импульсов, работающий в автоматическом режиме. Импульсный дальне- или среднеструйный дождевальный аппарат, работающий по сигналам понижения давления в трубопроводной сети (рисунок 1.20), состоит из трех основных элементов: резервуара (гидроаккумулятора) 6, запорного устройства 2, 3, 4 и 5 и ствола 1 с соплом.

Вода под высоким давлением, но с малым расходом подается в гидроаккумулятор 6, где постепенно накапливается. В период накопления воды клапаны 3 и 4 закрывают проход в ствол 1, и вода не может выйти через него. По мере поступления воды находящийся в гидроаккумуляторе воздух сжимается, давление его повышается. При достижении верхнего давления генератор командных импульсов сбрасывает давление в напорной сети, вследствие чего под действием сжатого воздуха клапаны 4, а затем 8 открываются и происходит выброс накопленного объема воды – «выстрел». В момент выстрела срабатывает механизм вращения, и корпус аппарата поворачивается на заданный угол. Срабатывание всех дождевальных аппаратов происходит синхронно. Клапан 4 закрывается под действием пружины 5 при падении давления в гидроаккумуляторе до нижнего предела. Клапан 3 закрывается под действием поршня 2 при повышении давления в сети, после чего цикл повторяется. Продолжительность периода накопления воды в гидроаккумуляторе составляет от 50 до 300 с. Давления $P_{\max}$ и $P_{\min}$ и диаметр выходного отверстия сопла $d$ выбирают, исходя из необходимой дальности полета струи $R$ и отношения $P_{\max}/d$, определяющего диаметр капель, на которые распадается струя.

При импульсном дождевании дальность полета струи значительно больше, чем при непрерывном истечении. Радиус действия (дальность полета струи) – от 20 до 70 м. По объему выброса воды за один рабочий цикл различают аппараты малого (до 3 л), среднего (от 3 до 10 л) и большого (более 10 л) объемов выброса. Наиболее распространены аппараты среднего объема выброса. Так как импульсные дождевальные аппараты работают с подводимыми расходами (0, 1...2 л/с), во много раз меньшими, чем обычные (10...40 л/с), то это позволяет в 5–8 раз уменьшить диаметры водоподводящих трубопроводов и применить насосно-силовое оборудование малой мощности, в результате чего капитальные затраты на строительство снижаются более чем в 3 раза. Так как диаметр водоподводящих трубопроводов составляет 12...30 мм, то возможно применение пластмассовых труб с укладкой бестраншейным способом.

Резкое снижение интенсивности дождя позволяет использовать импульсные дождевальные системы для орошения склонов с почвами низкой водопроницаемости, исключает эрозию; так как почва не переувлажняется, то почвенная корка не образуется и отпадает необходимость в послеполивной обработке почвы.

### 1.4. Машины для поверхностного полива

При поверхностном поливе воду в поливную сеть подают и распределяют по площади трубками-сифонами, а также гибкими шлангами с водовыпусками и поливальными машинами.

Сифоны – это изогнутые трубки, по которым воду переливают из оросителя на поля, расположенные ниже уровня оросителя. Изогнутую часть трубки (колено) обычно монтируют выше уровня воды в оросителе. Перед пуском в работу сифоны заполняют водой и вручную раскладывают вдоль оросителя. Промышленность выпускает сифоны-водовыпуски диаметром 150 и 250 мм с регулируемым расходом воды в пределах 10,5...42 л/с, неразрязающиеся сифоны СНП и СНК с расходом воды 0,08...0,98 л/с и полиэтиленовые трубки-сифоны диаметром 20, 25, 32, 40 и 50 мм. Один рабочий-поливальщик управляет работой 50–120 сифонов.

**Гибкие поливные трубопроводы** изготавливают из полиэтилена или капроновой ткани, покрытой специальным составом. Трубопроводы необходимой длины составляют из отрезков длиной 100...120 м. Рабочее давление в них не более 0,04...0,06 МПа. Чтобы исключить заиление, скорость воды в трубопроводе должна быть не менее 0,7 м/с. Для подачи воды в борозды трубопровод укладывают поперек, располагая водовыпуски с шагом, равным ширине междурядий. По окончании полива трубопроводы освобождают от воды и наматывают на барабан.

**Поливальный передвижной агрегат ППА-165У** предназначен для полива орошаемых культур по бороздам с забором воды из временных оросительных каналов или лотков, расположенных параллельно или перпендикулярно к поливным бороздам.

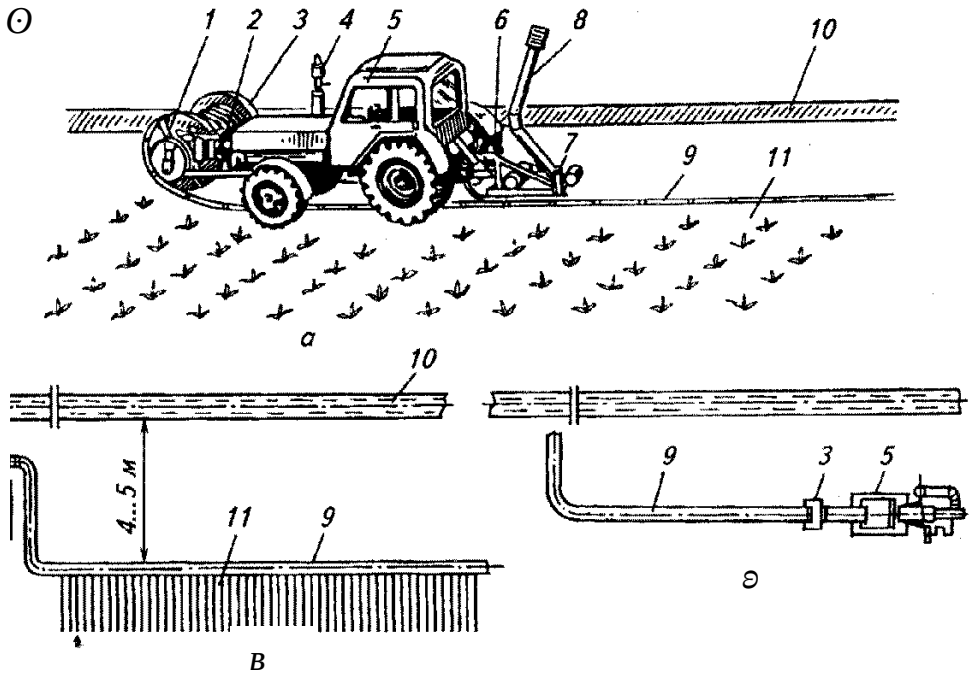
Поливальщик состоит из сборочных единиц, смонтированных на тракторе Т-40. Насосная станция, включающая в себя насос 7 (рисунок 1.21 *б*), редуктор 6, всасывающий 8 и напорный 9 трубопроводы, навешивается на трактор сзади. Насос предназначен для подачи воды из водоисточников в поливные трубопроводы. Всасывающий поворотный трубопровод 8 с сетчатой заборной коробкой на конце опускают в рабочее положение и поднимают гидроподъемником в транспортное. К напорному патрубку насоса присоединена клапанная коробка с обратным клапаном. На выпускной трубе трактора установлен эжектор 4, соединенный шлангом с всасывающим трубопроводом.

Барабан 3, лебедка 1 и механизм привода смонтированы на рамке, закрепленной на продольных балках трактора. На барабан 3 наматывают гибкий трубопровод 9, на барабан лебедки 1 – трос. Механизм привода служит для вращения барабана и лебедки при раскладке и сборке трубопровода 9. Он включает в себя червячный редуктор и гидромотор 2, работающий от гидросистемы трактора.

Трубопровод 9 составляют из четырех отрезков длиной по 120 м и диаметром 350 мм. Отрезки изготовлены из мелиоративной капроновой ткани. Каждый отрезок водовода перфорирован. На нем можно устанавливать водовыпуски на расстоянии 60 или 90 см один от другого. Это обеспечивает полив культур, посеянных с междурядьями 60...90 см. Регуляторами водовыпусков изменяют подачу воды в борозды от 0,2 до 2 л/с. Отрезки трубопровода соединяют между собой специальными патрубками.

Рабочий процесс поливальщика ППА-165У состоит из трех операций (рисунок 1.21): раскладки гибкого поливного трубопровода (*О*), полива (*в*) и сборки трубопровода (*э*). Раскладывают трубопровод 9 при движении трактора 5 вдоль боковой границы поля поперек борозд. После раскладки первого отрезка агрегат останавливают и первый отрезок соединяют со вторым, располагая водовыпуски соединяемых отрезков на одном уровне.

По окончании раскладки трубопровода поливальщик устанавливают вблизи оросителя, насосную станцию переводят в рабочее положение, к напорному патрубку насоса присоединяют свободный конец трубопровода и пускают станцию в работу. Для этого перекрывают обратным клапаном нагнетательную магистраль и включают эжектор 4 (рисунок 1.21 *О*).




*О*– раскладка трубопровода; *в* – полив; *э* – сборка трубопровода;
1 – лебедка; 2 – гидромотор; 3 – барабан; 4 – эжектор; 5 – трактор;
6 – редуктор; 7 – насос; 8, 9 – всасывающий и гибкий напорный трубопроводы; 10 – ороситель; 11 – борозды

Рисунок 1.21 – Схема рабочего процесса полива машиной ППА-165У

После заполнения всасывающей магистрали и насоса водой отключают эжектор, включают вал отбора мощности трактора, и насос начинает подавать воду в трубопровод. Вода из открытых водовыпусков поступает в борозды и распределяется по орошаемому участку. После выдачи поливной нормы собирают трубопровод и переезжают на другую позицию.

Перед сборкой трубопроводы промывают от наносов, прогоняя через них и сбрасывая воду. Сборку трубопровода проводят дистанционно, без заезда трактора на поле. Для этого стыки трубопроводов разъединяют, ближайший конец отрезка закрепляют на барабане, а к другому концу присоединяют трос лебедки. В процессе намотки дальний конец отрезка подтягивается тросом.

Расход воды 150...200 л/с, давление 0,04...0,05 МПа, ширина захвата 300 м, производительность при поливной норме 600 м$^3$/га составляет 1,1 га/ч. Поливальщик обслуживают тракторист и рабочий.

**Передвижной поливальщик ППА-300** предназначен для полива культур, возделываемых в рисовом севообороте, а также для влагозарядных и промывных поливов в зонах орошения. Поливальщик агрегатируют с трактором МТЗ-80. Устройство сборочных единиц и размещение их на тракторе аналогичны машине ППА-165У. Отличается лишь устройство трубопровода, предназначенного для транспортировки и распределения воды напуском.

Трубопровод собирают из четырех гибких шлангов длиной по 120 м и диаметром 350 мм. Каждый отрезок трубопровода снабжен диаметрально расположенными водовыпусками, расставленными на расстоянии 20 м один от другого. Регуляторами, установленными на водовыпусках, подачу воды можно изменять от 0 до 25 л/с.

После раскладки трубопровода машину устанавливают вблизи оросителя, подсоединяют конец поливного трубопровода к напорной магистрали насоса и пускают станцию в работу. Из насоса вода поступает в поливной трубопровод и через водовыпуски распределяется по чеку, затопляя всю площадь слоем 5...25 см.

Насос поливальщика обеспечивает работу с расходом воды 250...300 л/с при давлении 0,05...0,08 МПа. Ширина захвата машины 480 м, производительность при норме полива 1200 м$^3$/га составляет до 0,9 га/ч.

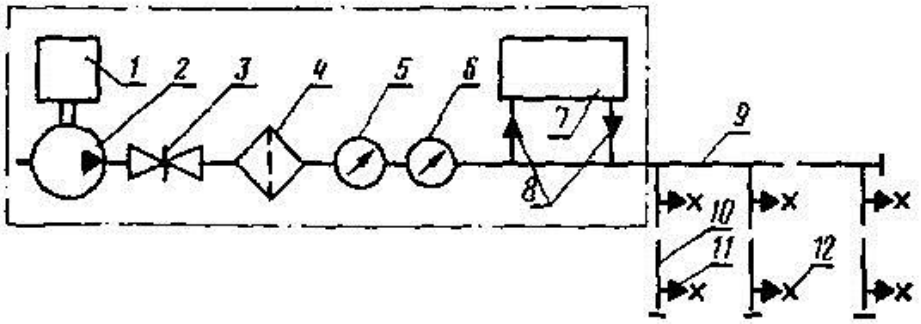
### 1.5. Системы капельного орошения

Системы дают еще большее рассредоточение поливного тока, так как позволяют локально подводить воду к каждому растению в виде отдельных капель с помощью точечных микроводовыпусков-капельниц. В систему капельного орошения (рисунок 1.22) входят: контрольно-распределительный блок 1...8, магистральный трубопровод 9, распределительные трубопроводы 10, капельницы 11. Контрольно-распределительный блок, как правило, вклю-

чает в себя мотор 1, насос 2, задвижку 3, фильтр 4, водомер 5, манометр 6, бак-смеситель 7 и инжектор 8.

Системы капельного орошения проектируют обычно с давлением 0,07...0,28 МПа. Низконапорные системы считаются предпочтительнее, так как в них можно применять более дешевые трубы и капельницы большего диаметра, что уменьшает вероятность их забивания. Для создания необходимого напора используют насосы небольшой мощности и производительности, водонапорные башни, а иногда и просто перепад отметок между источником водоснабжения и орошаемой площадью (самотечные системы). Магистральный 9 и распределительные 10 трубопроводы монтируют, как правило, из полиэтиленовых труб обязательно черного цвета (для предотвращения развития водной растительности), первые – диаметром 38...51 мм, вторые – от 6 до 19 мм. Трубопроводы в низконапорных системах монтируют без соединительных муфт, вставляя трубы одна в другую. Расстояние между распределительными трубопроводами – от 0,8 м для полевых культур до 6 м для плодово-ягодных и соответствует ширине междурядий.

Капельницы изготавливают из пластмассы темного цвета с расходом от 1 до 15 л/ч. Их конструкции весьма разнообразны. Наиболее простая представляет собой микротрубку из полиэтилена высокой плотности с внутренним диаметром от 0,3 до 2,0 мм; регулирование расхода – за счет изменения потерь на трение, т. е. путем изменения длины микротрубки. Более надежна в смысле предотвращения забивания капельницы с отверстием большого диаметра микротрубка, состоящая из цилиндра и ввернутой в него пробки. Пространство между нарезкой пробки и внутренней резьбой цилиндра образует спиральный проход, по которому идет вода. Вворачивая или выворачивая пробку, изменяют длину пути, а следовательно, и расход воды. Вытекая каплями, вода увлажняет почву в виде зоны эллипсовидной формы глубиной около 1 м и шириной до 2,6 м с выходом на поверхность у основания ствола дерева. При этом почва в междурядьях поддерживается в сухом состоянии, что создает неблагоприятные условия для роста сорняков.




1 – двигатель; 2 – насос; 3 – задвижка; 4 – фильтр; 5 – водомер; 6 – манометр; 7 – бак-смеситель; 8 – инжектор; 9 – магистральный трубопровод; 10 – распределительный трубопровод; 11 – капельница; 12 – растение

Рисунок 1.22 – Схема системы капельного орошения

Уменьшение объема увлажняемой почвы позволяет экономить воду и приводит к формированию менее разветвленной корневой системы, дающей возможность уплотнить посадки и повысить продуктивность. Этот способ обеспечивает наиболее высокую отдачу урожая на единицу затраченной воды и удобрений, так как обеспечивает оптимальный водный и питательный режим почвы, позволяет полностью автоматизировать подачу воды в соответствии с потребностями сельскохозяйственных культур. В рассматриваемых системах, однако, пока еще высока первоначальная стоимость и есть вероятность закупорки капельниц из-за естественного загрязнения воды.

Качество и надежность полива зависят от конструкций капельниц 19. Они могут быть выполнены в виде полиэтиленовых микротрубок диаметром 0,3...2 мм и нарезных пробок, а также диафрагменными, мембранными и поплавковыми. Наиболее совершенные капельницы снабжены несколькими водовыпусками и оборудованы устройствами для стабилизации расхода при переменном давлении в сети и самоочистки микроканалов от взвешенных наносов. Применение капельного орошения особенно перспективно в районах с ограниченными водными ресурсами, а также на участках с изрезанным рельефом и крутыми склонами с большими перепадами высот (до 60 м).

### 1.6. Машины для внутрипочвенного орошения

Вода с помощью труб увлажнителей или специальных рыхлительных рабочих органов вводится непосредственно в корнеобитаемый слой почвы. Системы с использованием труб увлажнителей могут быть безнапорными и напорными. В первом случае система действует без машин, во втором – используются насосные установки общего назначения.

Машинный способ основан на применении рыхлительных рабочих органов с водопроводящими каналами, через которые вода попадает в междурядья на глубину рыхления, соответствующую глубине расположения корневой системы растений. По способу подвода воды такие машины подразделяют на два типа: с проходным и наматываемым трубопроводами.

В первом случае гибкий трубопровод, снабженный пружинными водовыпускными клапанами, укладывают вдоль пути машины и пропускают через водоприемное нажимное, смонтированное на машине устройство. В процессе движения машины посредством последнего открывают пружинные клапаны и вода поступает сначала в бак, а затем через рабочие органы в корнеобитаемый слой почвы.

Во втором случае трубопровод, один конец которого присоединен к гидранту, а другой к приемной колонке машины, наматывается на барабан с реверсивным приводом или сматывается с него в зависимости от направления движения.

Для подпочвенного полива деревьев и кустарников применяют машины с рабочими органами в виде гидробуров.

## 1.7. Рынок дождевальной техники в России

Российские, украинские и европейские производители техники для полива предлагают большое разнообразие типов и моделей машин и установок.

Волгоградский завод оросительной техники предлагает к реализации три модели дождевальных машин «Волжанка», дальноструйные дождеватели ДД-100ВН; ДД-70ВН; ДДК-30, системы капельного орошения.

Нижегородская фирма ЗАО «Фрегат» предлагает восемь моделей ДМУ «Фрегат» с расходом воды от 28 до 65 л/с, с длиной трубопровода от 199 до 337 метров.

Завод ЗАО «Фрегат» в г. Николаеве (Украина) предлагает 20 модификаций ДМУ «Фрегат» с длиной трубопровода от 199 до 572 метра. Завод производит машину «Фрегат-ДМЭ» с электрическим приводом тележек и возможностью фронтального перемещения. Расход воды 75...150 л/с, длина трубопровода 400...450 метров.

Кропоткинский машиностроительный завод Краснодарского края предлагает к реализации семь моделей машины «Кубань-ЛК1» кругового действия и «Кубань-Л» фронтального перемещения.

Херсонский машиностроительный завод (Украина) производит дождевальные агрегаты ДДА-100МА-1 и ДДА-100В.

Фирма Beinlich Agrarpumpen und maschinen GmbH (Германия) предлагает к реализации на россиском рынке струйные дождеватели различных типоразмеров: Monsun 1; Monsun 2; Monsun 2 Super; Primus 1800; Primus 2000; Primus 2500; Primus 2700; Quattro 1; Quattro 2. Длина трубопровода достигает 750 метров.

Машины предназначены для полива дождеванием различных культур на больших площадях, включая овощи, и определяют рациональное и прибыльное решение при возделывании свеклы, картофеля, кукурузы, гороха, бобовых и др. Серия дождевальных машин Monsun является полной блочно-модульной системой.

Разработки и новшества:

• фронтально расположенная турбина;

• электронная регулировка сматывания;

• штатив, работающий в колее;

• укладка трубопровода в колею;

• цепная передача на внешний резиновый профиль барабана;

• двухосное портальное шасси.

Для орошения с наименьшими затратами все модели серийно оснащены следующим оборудованием:

• приводная турбина;

• электронная регулировка сматывания КК 7-РК 10;

• отключение при недопустимом повышении или понижении давления, а также аварийное отключение при полном сматывании;

• гидравлическое присоединение штатива;

• закрытая коробка передач с долговременной смазкой и не требующей ухода цепной передачей;

• дождевальный аппарат с медленным обратным ходом;

• жесткая несущая рама шасси.

Для поля шириной 600…800 м предназначены две модели с шириной барабана 1650 мм. Фирма Beinlich применила здесь трубопровод из специального материала, что, безусловно, требовалось в связи с возросшими нагрузками.

Трехосное шасси с 6 колесами (11,5…15) или с двумя осями и 4 колесами (12,5…18), полностью гидравлическое опорное устройство и устройство присоединения штатива, а также экономичный турбинный привод позволяют одному человеку без особых трудностей обслуживать машину.

Оригинальная турбина фирмы Beinlich устанавливается на все модели как отдельный модуль.

Электронный блок управляет намоткой барабана и служит контролером следующих операций:

• задержка в начальной и конечной позиции;

• точность скорости сматывания;

• аварийное и плановое отключение;

• показание длины трубопровода, времени работы установки;

Питание обеспечивается аккумулятором 12В, 25 А·ч, который помещен вместе с электронным блоком в герметичный шкафчик.

Отводной клапан для труб 3" и 4" обеспечивает скорость сматывания от 10 до 150 м/ч при давлении 0,35 МПа.

Большое передаточное отношение цепного привода через зубчатое колесо турбины и барабан позволяет развить усилие, достаточное для сматывания гибкой трубы длиной до 750 м. Самой турбине необходимо давление всего 0,01 МПа для скорости сматывания 10 м/ч и соответственно 0,03 для скорости 30 м/ч.

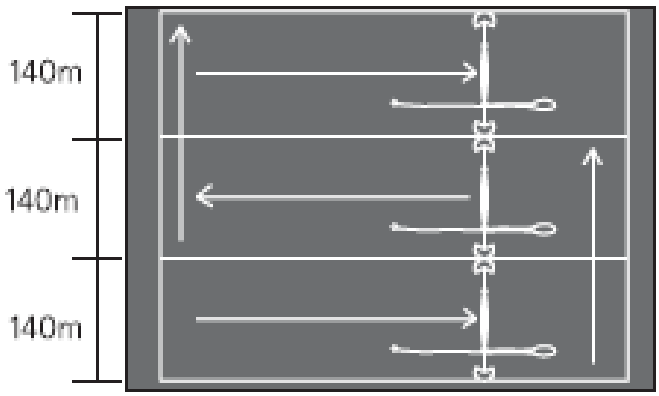
Не требующий обслуживания цепной привод барабана по его краю обеспечивает максимальное передаточное отношение.

Компании Reinke и Valmont успешно конкурируют на российском рынке, предлагая надежные и совершенные машины с множеством дополнительных опций.

Фронтальная система с перпендикулярной буксировкой (рисунок 1.23).

Она перемещается с позиции на позицию перпендикулярно направлению движения при поливе.

Ипподромная система предназначена для полива квадратных, прямоугольных и трапецеидальных площадей за счет вращающейся центральной части тележки, которая может поворачиваться в одной или нескольких точках поля (рисунок 1.24).




PIVOT однопролетный
фронтального действия

Рисунок 1.23 – Схема перпендикулярной буксировки

***Ипподромная система***

***Стандарт***



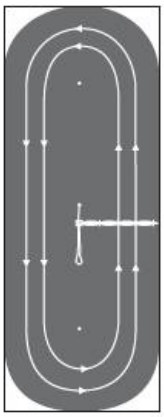


Рисунок 1.24 – Схема ипподромной системы

***Ипподромная система Multi***



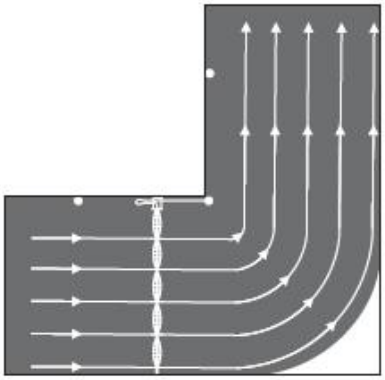


Рисунок 1.25 – Схема орошения Г-образного поля

Система орошает участки “L” и “U” формы за счет вращения колес тележки в разных направлениях в зависимости от направления движения машины (рисунок 1.25).

### 1.8. Требования к машинам и энергоемкость полива

К дождевальным машинам и установкам предъявляют агробиологические, экологические и технико-экономические требования [31]. К агробиологическим следует отнести требования, обеспечивающие оптимальные (рациональные) условия снабжения растений водой, экологическим – сохранение почв и их плодородия и технико-экономическим – повышение производительности, снижение энергоемкости и т.п.

**Агробиологические требования** заключаются в следующем [32]. Для достижения малоинтенсивного (бесстрессового) воздействия процесса орошения на растения отношение интенсивности водоподачи к интенсивности водопотребления должно находиться в пределах 1...50. Равномерность распределения воды на поле должна удовлетворять следующим требованиям: Коэффициент эффективности полива – $K_{эф.}\geq 0{,}7$; коэффициенты недостаточного и избыточного полива – $K_{дн.}\leq 0{,}15$; $K_{дв.}\leq 0{,}15$. Отклонение от среднего слоя выпавшего дождя не должно превышать ±25% для машин с коротко- и среднеструйными и ±30% – с дальнеструйными аппаратами. Для сохранения растений от механических повреждений в процессе подготовки и проведения поливов коэффициент их повреждаемости должен быть 0,5...2,0%, а среднекубический диаметр капель дождя $d$ =1 мм.

**Экологические требования** заключаются в следующем [33, 34]. С целью сохранения структуры и водопрочности почвенных агрегатов, активной жизнедеятельности микроорганизмов в почвообразовательном процессе и повышения плодородия почв содержание влаги в порах почвы должно находиться в пределах 70...90%, воздуха – 10...30%, а отклонение от этих интервалов не должно превышать ±5%. Для предупреждения водной эрозии почвы скорость движения потока воды в поливной борозде должна быть меньше критически допустимой из условий неразмываемости почвы, а для предупреждения лужеобразования и стока средняя интенсивность дождя должна быть меньше или равна скорости впитывания воды в почву. Чтобы исключить разрушение почвенных агрегатов под действием ударов капель дождя, их диаметр не должен превышать 1,5 мм для коротко- и среднеструйных и 1,8 мм для дальнейструйных аппаратов.

**Технико-экономические требования** включают большое число показателей [11, 35]. Однако к наиболее важным из них относятся эффективное использование земли, производительность машин и энергоемкость выполняемого ими процесса. Коэффициент земельного использования, учитывающий потери площади под оросительной сетью и поливной техникой, должен быть равен или больше 0,97.

Теоретически возможная производительность любой дождевальной машины или установки при заданной поливной норме $m$, м$^3$/га, может быть определена по формуле

$$W = \frac{Q}{m}, \qquad (1.1)$$

где $W$ – часовая производительность, га/ч;

$Q$ – объемная подача воды насосом, м$^3$/ч;

$m$ – заданная норма полива, м$^3$/га.

Действительная производительность дождевальных машин, работающих в движении, как и любых других мобильных средств, зависит от ширины захвата, скорости движения и коэффициента использования рабочего времени. Разница заключается лишь в том, что во избежание образования луж на почвах с небольшой впитывающей способностью поливать можно не за один, а за несколько проходов. В таких случаях необходимое число проходов $n = m/h$, где $m$ ï поливная норма, мм; $h$ – слой воды, вылитый за один проход, мм. Производительность машин, работающих позиционно, зависит от размера площади $S$, орошаемой с одной позиции, и числа позиций $z$ в смену, т.е. ı = $Sz$. За продолжительность смены σ число позиций $z = kT/t$, где $k$ ï коэффициент использования рабочего времени; $t$ – продолжительность полива с одной позиции.

**Энергоемкость процесса.** Мощность струи, представляющая собой расход энергии в единицу времени,

$$N = p \cdot Q_{dk} / \eta, \qquad (1.2)$$

где $N$ – мощность, необходимая для работы машины, кВт;

$p$ – рабочее давление, МПа;

$Q_{dk}$ – объемный расход, л/с;

$\eta$ – коэффициент полезного действия машины.

Характеристикой энергоемкости дождевальной машины или установки можно считать расход энергии на единицу производительности.

Разделив выражение (1.2) на (1.1) и согласовав размерности единиц, получим, что удельный расход энергии пропорционален рабочему давлению и норме полива. Таким образом, наименее энергоемкими следует считать дождевальные машины и установки с короткоструйными насадками, а наиболее энергоемкими – машины, оборудованные дальнеструйными аппаратами.

Технико-экономическими требованиями предусматривается ограничение удельного расхода энергии на 1 м$^3$ поливной воды в следующих пределах: 20,5...1,5 кВт·ч/м$^3$ для дождевальных машин и установок и 0,05...0,2 кВт · ч/м$^3$ для установок капельного и внутрипочвенного орошения.

### 1.9. Краткий обзор исследований процесса дождевания

Вопросами движения дождевальных струй, условиями их распада, движения капель в воздушной среде с целью определения радиуса действия струйными дождевальными аппаратами занимались многие исследователи.

Известны зависимости определения радиуса действия дождевального аппарата – формулы Ф.И. Пикалова, В.М. Марквартде, Б.М. Лебедева, А.П. Исаева, Ф.И. Козлова [12,16, 37, 38]. Одни из них не учитывают влияние ветра, другие достаточно сложны и громоздки для практического использования. Значительный интерес представляет зависимость, определенная А.И. Козловым и М.В. Манасяном [38]. В работе отмечается, что при давлении более 0,3 МПа не наблюдается увеличение радиуса полива аппаратами типа "Роса" и "Фрегат", очевидно вследствие значительного уменьшения размеров капель, т.е. кинетической энергии. Получена зависимость радиуса полива от рабочего давления, коэффициента расхода, диаметра сопла, угла наклона ствола, скорости ветра и высоты расположения аппарата. Предложенная формула достаточно универсальна, но при построении модели можно пользоваться более простой зависимостью радиуса полива от скорости и направления ветра [39].

Одно из основных требований, предъявляемых к вегетационным поливам с.х. культур – наиболее равномерное увлажнение всей увлажняемой площади. Это создает благоприятные условия для своевременного и качественного проведения междурядных обработок, способствует равномерному росту, развитию растений и созреванию урожая, повышает эффективность агротехнических мероприятий [15, 40].

Один из недостатков орошения дождеванием – ухудшение равномерности распределения воды за счет сноса ее ветром за пределы орошаемого участка. Эти потери воды зависят от многих факторов: скорости ветра, типа дождевального аппарата и других [41, 42, 43, 44, 46, 47]. Ухудшение равномерности распределения осадков приводит, в свою очередь, к уменьшению урожайности, так как урожай на площади орошения есть сумма слагаемых урожаев, полученных на элементарных площадях, примерно равных площади питания одного растения [26]. При прочих равных условиях возделывания культуры, равномерность распределения поливной воды является определяющим фактором создания урожая, величина которого изменяется в зависимости от влагообеспечения этих элементарных площадей. Влияние ветра на качество полива дальнеструйных дождевальных аппаратов одним из первых отечественных ученых в 1972 году рассматривал Н.П. Бредихин [42]. Исследованиями ветроустойчивости струйных аппаратов, в основе которых лежит теория, предложенная Н.П. Бредихиным, занимались в ЮжНИИГиМе, АзНИИГиМе, ВИСХОМе. Исследования, проведенные в ЮжНИИГиМе, показали, что в зависимости от скорости ветра целесообразно изменять угол наклона ствола от 12° до 32°. Против ветра угол должен быть меньше оптимального, а по ветру – больше оптимального. По результатам исследований разработана и испытана экспериментальная установка с изменяющимся углом наклона на базе дождевальной машины ДДС-100 "Нептун". К аналогичным выводам в результате исследований пришли и в ВНИИГиМе [31]. Однако некоторые исследования показывают, что угол наклона ствола к горизонту в зависимости от скорости ветра должен уменьшаться от оптимального и не

зависит от направления ветра [48, 49]. Вопросы орошения горных склонов рассматривались в Грузинском СХИ. Г.Е. Тугуши и другие авторы исследовали характеристики дождевальных струй, занимались подбором и расстановкой дождевальных аппаратов с соблюдением требования максимально полезной площади дождевания [50, 51]. Установлены рациональные параметры компоновки аппаратов в зависимости от уклона поверхности орошения [52, 53]. В США была разработана дальнеструйная дождевальная машина "Tadjmater" с приспособлением для изменения угла наклона ствола при ветре и скорости вращения дождевального аппарата (расход 128 л/с, дальность полета струи 76 м, расстояние между позициями 122...126 м). Вращение дождевального аппарата осуществлялось при помощи гидромотора, приводимого в движение турбинкой, расположенной во всасывающей линии машины [35]. Однако до сих пор не налажен серийный выпуск аппаратов с автоматически изменяющимся углом наклона ствола к горизонту ввиду сложности конструкции и ненадежности работы.

Во время полива дождевальных машин со среднеструйными дождевальными аппаратами при скорости ветра более 3 м/с орошаемая площадь уменьшается на 30...60%, интенсивность дождя в связи с этим увеличивается в 1,5–2 раза, неравномерность полива резко увеличивается. Поэтому рекомендуется работать при скорости ветра не более 2...2,5 м/с. Из-за влияния ветра производительность дождевальных машин фронтального действия снижается на 15...20% [54]. Предлагались различные пути улучшения качества полива, основные из них – полив по сектору и изменение угла наклона ствола за время одного оборота в зависимости от направления ветра. Такие способы улучшают равномерность полива при ветре, но имеют свои недостатки: в первом случае – снижение производительности машины, во втором – при уменьшении угла наклона ствола увеличивается энергия ударного воздействия капель.

В свое время Н.П. Бредихиным [42, 55] в институте ЮжГипроводхоз была разработана методика оценки работы дальнеструйных дождевателей при ветре. Суть ее состоит в том, что площадь орошения аппаратом при ветре условно называется "эллипсом орошения" и после построения изогиет дождя разбивается на секторы по 45 и 90 градусов и зоны – по 160, определенным образом ориентированные относительно направления ветра и направления вращения аппарата.

Н.П. Бредихин рекомендует использовать для оценки влияния ветра на качество орошения дальнеструйными дождевальными аппаратами два коэффициента:

а) коэффициент изменения секторных площадей, являющийся отношением площади максимального сектора к площади минимального сектора:

$$S_{yf} = \frac{F_{\max}}{F_{\min}},$$

где $F_{\max}$ – площадь максимального сектора;

$F_{\min}$ – площадь минимального сектора.

б) коэффициент изменения (ухудшения) равномерности полива, определяемый отношением наибольшей среднеэффективной интенсивности сектора к наименьшей среднеэффективной интенсивности сектора:

$$\text{[illegible]} = \frac{I_{\max}}{I_{\min}},$$

где $I_{\max}$ – наибольшая среднеэффективная интенсивность;

$I_{\min}$ – наименьшая среднеэффективная интенсивность.

Этими показателями характеризуется возможность работы дождевальных дальнеструйных аппаратов при данной скорости ветра. Получив эти коэффициенты для различных типов аппаратов, можно объективно судить о преимуществах тех или иных конструкций при различных скоростях ветра и для каждого аппарата дифференцированно рекомендовать предельно допустимые значения скоростей ветра, при которых им допустимо работать. Отношения максимальных секторных показателей к минимальным могут достигать значений 5–10 и более.

Эти особенности равномерности распределения дождя, а также изменение дальности полета струи при ветре позволили разработать мероприятия по значительному повышению качества работы дальнеструйных аппаратов.

Методика, разработанная Гусейн-Заде [30, 45], рекомендует значительно уменьшать расстояние между позициями дождевальных аппаратов в зависимости от ветровых режимов. Так, например:

1. С учетом направления господствующих ветров (при наличии стабильных ветровых режимов) расстановка параллелограмма со сторонами:

- в направлении, перпендикулярном направлению ветра: $L_1=E_1 \cdot 1{,}42$ [illegible],

где $L_1$ – расстояние между позициями аппаратов;

[illegible] – дальность полета струи при безветрии;

[illegible] – коэффициент сужения.

- вдоль направления ветра: $L_2= 1{,}42 \cdot$ [illegible].

2. При наличии нестабильных ветровых режимов: $L_1=L_2=E_1 \cdot 1{,}42 \cdot$ [illegible].

По данной методике расстояние между аппаратами при скорости ветра 8 м/с уменьшается на 33%.

Отечественные и зарубежные исследования [13, 16, 43] рекомендуют для получения максимальной дальности полета струи против направления ветра уменьшить угол вылета струи по ветру, при этом значительно увеличивается площадь увлажнения по сравнению с использованием аппаратов с постоянным углом наклона ствола.

Все струйные дождевальные аппараты подразделяются на аппараты с постоянным углом наклона ствола к горизонту и на аппараты с переменным углом наклона. В свою очередь аппараты с постоянным углом наклона ствола

подразделяются на три группы по углу наклона. В нашей стране выпускаются серийные аппараты одной группы с углом наклона ствола порядка 30 градусов. Аппараты с переменным углом наклона подразделяются на аппараты с ручной регулировкой угла наклона и с автоматическим изменением угла наклона в зависимости от направления скорости ветра, которые в свою очередь бывают с постоянной и переменной скоростью вращения. Аппараты с изменяемым углом наклона ствола в нашей стране серийно не выпускаются. Аппараты с ручной регулировкой угла наклона ствола выпускаются итальянской фирмой "Comet".

Наибольшее количество модификаций имеют одни из самых распространенных дождевальных машин типа "Фрегат", "Кубань". В последнее время сконструированы машина фронтального перемещения с гидроприводом "Каравелла", электрифицированная многоопорная машина конструкции кругового действия "Бригантина".

После начала серийного выпуска ДМ "Кубань" в 1980 году начались исследования машин фронтального действия. В это время появляются работы Г.П. Лямперта, В.Ф. Носенко, С.Н. Никулина, В.Г. Луцкого, С.С. Савушкина и других [21, 28, 47, 56].

### 1.10. Выводы

Полив – наиболее эффективный способ повышения урожаев, один из основных факторов интенсификации сельскохозяйственного производства. Поливная техника занимает важное место в системе машин для мелиорации.

Вместе с поливной водой при поливе дождевальными и поливными машинами могут вноситься сухие минеральные удобрения и животноводческие стоки.

Поливная техника может быть использована и для внесения жидких минеральных удобрений, микроэлементов, пестицидов и химических мелиорантов.

Повышение равномерности полива способствует увеличению урожайности сельскохозяйственных культур и снижению себестоимости урожая за счет уменьшения непроизводительного расхода воды.

Научной основой для повышения равномерности орошения могут служить методы математического моделирования с использованием современных систем компьютерной математики.

В связи с разнообразием принципов работы техники для орошения возникают следующие задачи по составлению моделей:

– моделирование распределения воды стационарными дождевальными аппаратами и насадками при одиночном и групповом их расположении;

– моделирование распределения воды машинами фронтального перемещения и позиционной работы;

– моделирование распределения воды и жидких удобрений машинами фронтального непрерывного перемещения;

– моделирование распределения воды и удобрений машинами кругового действия;

– использование моделей для оптимизации размещения аппаратов на трубопроводе и выбора позиций машин.

# 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЖДЕВАНИЯ СТАЦИОНАРНЫМИ СИСТЕМАМИ И МАШИНАМИ ПОЗИЦИОННОГО ДЕЙСТВИЯ

## 2.1. Моделирование процесса дождевания струйными аппаратами при работе по кругу

Проектирование, испытания и настройка дождевальных машин связаны со значительными затратами трудовых и материальных ресурсов, занимают много времени. Применение систем автоматизированного проектирования для этих целей позволяет ускорить разработку машин, снизить затраты. В настоящей главе предложены программы для математического моделирования процессов распределения воды стационарными дождевальными аппаратами или установленными на машине позиционного действия.

Вращение аппарата считаем равномерным, если за один цикл импульсного движения перемещение значительно меньше размера зоны дождевания. Аппарат работает по кругу или по сектору.

Дефлекторные насадки работают при малых давлениях, чем достигается снижение энергоёмкости процесса распределения жидкости по полю, кроме того, они могут давать более равномерное распределение воды [59, 60]. Недостатком секторных насадок является снижение размеров зоны дождевания и, следовательно, повышение интенсивности дождя. Если почва имеет малую впитывающую способность, то приходится увеличивать скорость движения машины или уменьшать подачу воды в машину. Последнее приводит к уменьшению производительности машины, что нежелательно.

Оптимизация процесса работы машин по критериям равномерности распределения жидкостей позволяет снизить материальные и энергетические затраты, повысить вероятность качественной работы при изменении условий эксплуатации, например, рельефа поля или ветра. Оптимизацию предлагается выполнить на основе математического моделирования процесса [60].

Равномерность распределения жидкости по площади сначала оцениваем коэффициентом вариации доз $q_F$. Коэффициент вариации дозы связан с коэффициентом эффективного полива функциональной зависимостью, если известен закон распределения отклонений дозы как случайной величины. Удобство коэффициента вариации состоит в наличии стандартных функций для его вычисления практически во всех системах автоматизированного проектирования и в стандартных программах компьютеров.

Дождевальные машины ДШК-64А «Волжанка» и ДФ-120 «Днепр» работают позиционно. Колесный трубопровод ДШК-64А снабжен среднеструйными аппаратами, укомплектованными соплами 7 и 8 мм. Аппараты

расположены на трубопроводе в один ряд. Расстояние между позициями, в зависимости от диаметра сопел у аппаратов, может быть 18 или 24 метра.

Дождевальная машина ДФ-120 работает от гидрантов, расположенных на расстоянии 54 метра. Трубопровод снабжен открылками длиной 27 метров, на концах которых установлены среднеструйные дождевальные аппараты. Схему расположения аппаратов при дождевании можно изобразить прямоугольником размерами $A \times B$, где $A$ – расстояние между аппаратами на трубопроводе; $B$ – расстояние между позициями или открылками.

Стационарные дождевальные системы имеют такую же схему расстановки аппаратов, поэтому моделирование распределения воды такими системами можно выполнять по программам, составленным для машин позиционного действия. Для работы программ достаточно иметь экспериментальные данные о распределении воды по радиусам зоны полива, остальные характеристики вычисляются методом моделирования.

Моделирование выполняем при допущении о равномерном вращении аппаратов. За один цикл импульсного движения перемещение значительно меньше размера зоны дождевания, поэтому после наложения зон дождевания распределение воды получается таким, как и при равномерном непрерывном вращении аппарата. Аппараты таких машин обычно работают по кругу.

Дождевальные аппараты создают веер дождя, который орошает круг на поле. Площадь, орошаемую одним аппаратом, называем зоной дождевания. Построим математическую модель процесса при следующих допущениях: распределение дождя по углу веера или круга известно и задано плотностью вероятностей угла $f(\alpha)$ и расходом $Q$ так, что плотность потока воды, приходящегося на единицу угла, равна $q_\alpha = Q f(\alpha)$; распределение дальности полета капель по радиусам известно и задано плотностью вероятностей дальностей $f(\rho)$; расход $Q$ считается постоянным, скорость ветра равна нулю; высота установки аппаратов постоянна; поверхность поля горизонтальна; равномерность распределения жидкости по площади оцениваем следующими показателями: коэффициентом вариации доз $q_F$, коэффициентом эффективного полива, коэффициентом недостаточного полива, коэффициентом избыточного полива.

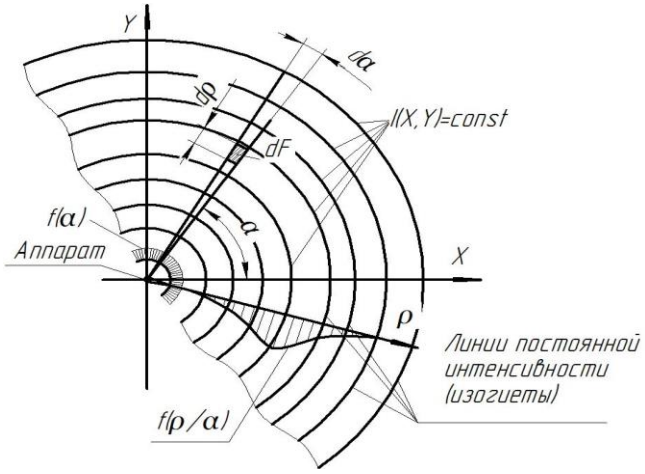



Рисунок 2.1 – Схема моделирования распределения воды дождевальным аппаратом

Пусть аппарат находится в центре системы координат $XOY$ (рисунок 2.1) и работает по кругу. Положение площадки $dF$ задаем в прямоугольных и в полярных координатах. Необходимость иметь

две системы координат объясняется тем, что аппарат движется по углу и выбрасывает струю по радиусу, а равномерность дождя необходимо определять по площади в прямоугольных координатах.

Вероятность попадания жидкости на элементарную площадку *dF*, выделенную в зоне дождевания двумя радиусами с углом между ними $d\alpha$ и двумя окружностями с приращением радиуса $d\rho$, определится как произведение вероятностей попадания в диапазон угла $d\alpha$ и радиуса $d\rho$, т.е.

$$t\{dF\} = f(\alpha)\cdot d\alpha \cdot f(\rho)d\rho .$$

Интенсивность дождя на площадке равна количеству воды, попадающей на нее в единицу времени, деленному на ее площадь. При независимых $\rho$ и $\check{U}$имеем

$$I = \frac{Q\cdot f(\alpha)\cdot d\alpha \cdot f(\rho)\cdot d\rho}{\rho \cdot d\alpha \cdot d\rho} = \frac{Q\cdot f(\alpha)\cdot f(\rho)}{\rho}. \qquad (2.1)$$

В системе СИ интенсивность дождевания измеряется кг/м$^2$·с, что равноценно привычному для мелиораторов – миллиметров слоя осадков за секунду.

Доза полива любой площадки стационарным аппаратом определяется произведением интенсивности на время работы *T*, т.е.

$$q_F = I\cdot T, \text{Ł}\text{G}/\,d\text{Ъ}^2. \qquad (2.2)$$

Прямоугольные координаты площадки *dF* связаны с полярными соотношениями:

$$\begin{cases} X = \rho\cdot\cos\alpha \\ Y = \rho\cdot\sin\alpha \end{cases} \qquad (2.3)$$

Струйный аппарат при работе по кругу вращается равномерно, следовательно, все значения угла равновероятны и плотность вероятности угла определяется формулой

$$f(\alpha) = \frac{1}{2\cdot\pi}. \qquad (2.4)$$

Плотность вероятностей дальности полета капель у аппарата с одним соплом, типа «Роса-1», аппроксимируется нормальным законом распределения

$$f(\rho) = \frac{1}{\sigma_\rho\sqrt{2\cdot\pi}}\exp\left(-\frac{(\rho - M_\rho)^2}{2\cdot\sigma_\rho^2}\right), \qquad (2.5)$$

где $\rho$ – дальность полета капель;

$M_\rho, \sigma_\rho$ – числовые характеристики дальностей полета капель.

Плотность вероятностей дальности полета капель у аппарата с двумя соплами определяется по формуле

$$f(\rho) = \frac{\text{и}_1}{\sigma_{\rho 1}\sqrt{2\cdot\pi}}\exp\left(-\frac{(\rho - M_{\rho 1})^2}{2\cdot\sigma_{\rho 1}^2}\right) + \frac{\text{и}_2}{\sigma_{\rho 2}\sqrt{2\cdot\pi}}\exp\left(-\frac{(\rho - M_{\rho 2})^2}{2\cdot\sigma_{\rho 2}^2}\right), \qquad (2.6)$$

где $C_1, C_2$ – весовые коэффициенты;

$M_{\rho 1}, \sigma_{\rho 1}$ – числовые характеристики дальностей полета от первого сопла;

$M_{\rho 1}, \sigma_{\rho 1}$ – числовые характеристики дальностей полета от второго сопла.

Весовые коэффициенты и числовые характеристики дальностей полета капель подбираются при моделировании по условию наиболее равномерного распределения воды по радиусам или по площади дождевания.

Покажем пример моделирования распределения воды дождевальными аппаратами типа «Роса-1» (рисунок 2.2). По технической характеристике аппарата принимаем $M_\rho = 11$ м, $\sigma_\rho = 3{,}2$ м, $Q$ = 1,2 л/с.

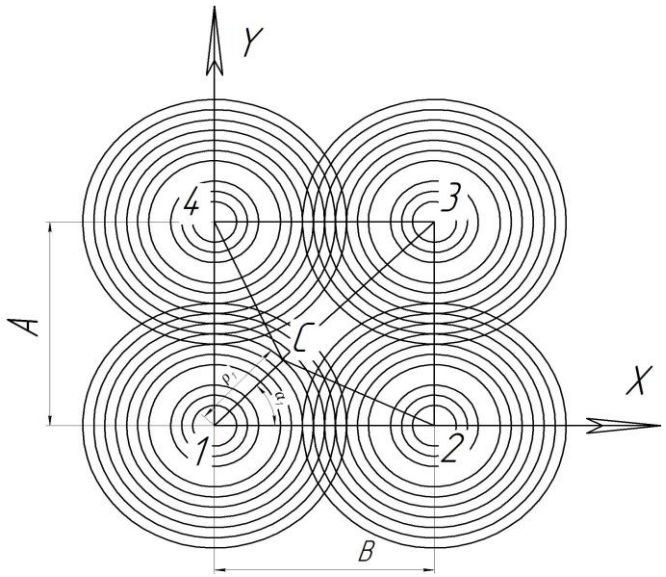



Рисунок 2.2 – Схема расположения аппаратов

Первый аппарат расположен в начале координат $XOY$, второй смещен по оси $X$ на расстояние $B$, третий имеет координаты $(B, A)$, четвертый – $(0, A)$.

Для наглядности моделирования задаем размеры общей зоны дождевания и вычисляем дозу полива всеми четырьмя аппаратами [61]. Для этого координаты точки *и (X,Y)* задаем в виде матрицы с шагом в один метр.

Меняя расстояния между аппаратами, пытаемся выбрать их по условию более равномерного распределения воды. Однако эта задача оказалась довольно сложной.

Количественную оценку равномерности на площади прямоугольника с размерами $\phi$ и $\lambda$ выполнили по матрице доз орошения. Пределы изменения координат *X, Y* задаем так, чтобы площадь квадрата, ограниченного линиями, соединяющими точки расположения аппаратов, разделилась на метровые участки. Дозы дождевания вычисляем в центре каждой площадки (рисунок 2.3). По результатам счета получаем матрицу доз *MD* с количеством элементов A B. По матрице доз вычисляли коэффициенты вариации, минимальную, среднюю и максимальную дозы при разных значениях $\phi$ и $\lambda$. При безветрии логично положить $\phi = \lambda$. Только при секторном поливе эти размеры

должны различаться. Далее вычисляли граничные значения доз эффективного полива:

$$q_{f\min} = q_{fsr} - 0{,}25 \cdot q_{fsr}; \quad q_{f\max} = q_{fsr} + 0{,}25 \cdot q_{fsr}.$$

По матрицам доз были составлены вариационные ряды и вычислены коэффициенты эффективного, избыточного и недостаточного полива (рисунок 2.3). Одну границу вариационного ряда принимали равной $q_{fsr}$. Следующую границу слева – $q_{f\min}$, справа – $q_{f\max}$. Далее границы назначали с шагом $0{,}25 \cdot q_{fsr}$ справа до превышения максимальной дозы в матрице, слева – до попадания в классовый интервал минимальной дозы. Среднюю дозу вычисляли по матрице и сравнивали её со значением

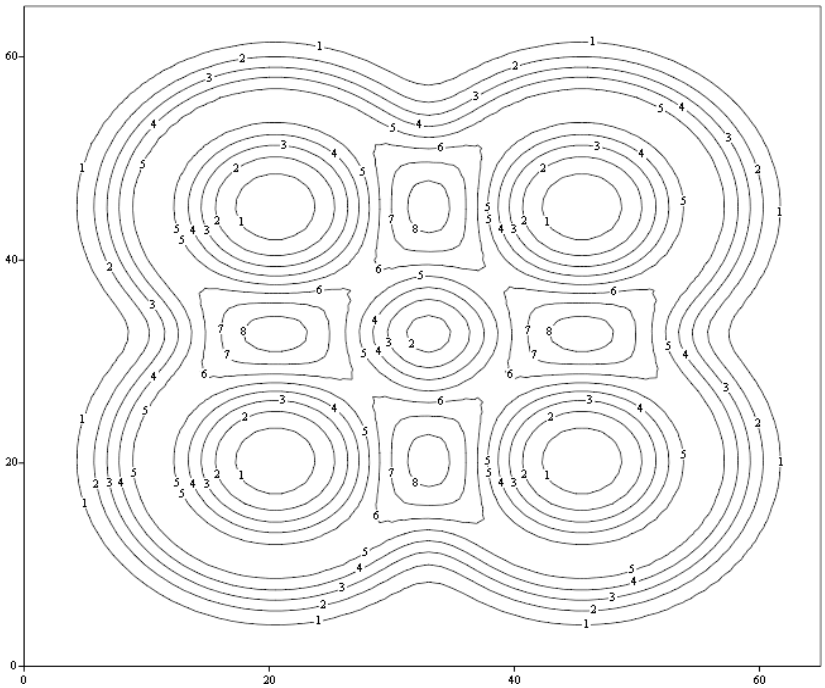
$$q_{Fsr} = \frac{Q \cdot T}{A \cdot B}.$$

$Q := 1.2$ $\quad M\rho := 11$ $\quad \sigma\rho := 3.2$ $\quad i := 0 .. 65$ $\quad X_i := i - 20.5$

$j := 0 .. 65$ $\quad Y_j := j - 20.25$ $\quad B := 25$ $\quad A := 25$ $\quad T := 2500$

$$ZD(X,Y) := \left( Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2 + Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \right) \ldots$$
$$+ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X)^2 + Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X)^2 + Y^2}} \ldots$$
$$+ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X)^2 + (A - Y)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X)^2 + (A - Y)^2}} \ldots$$
$$+ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{X^2 + (A - Y)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{X^2 + (A - Y)^2}}$$

$MD_{i,j} := ZD(X_i, Y_j)$




MD

Рисунок 2.3 – Программа и контурный график доз полива от четырех аппаратов

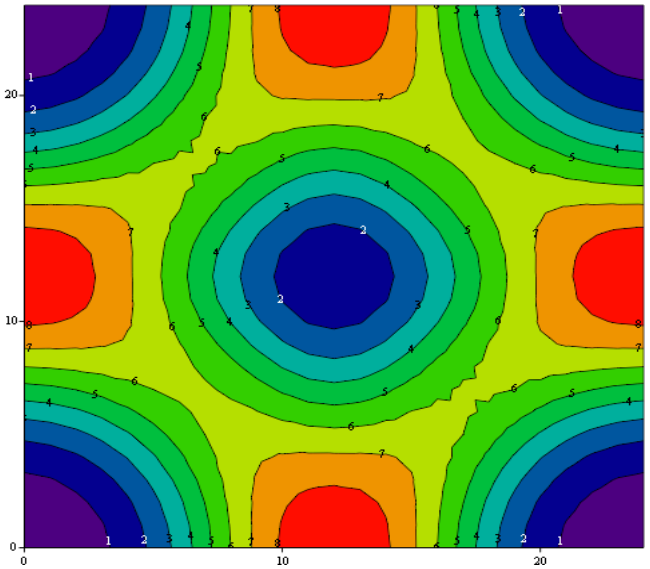
Исследования показали сложность получения равномерного распределения воды односопловыми стационарными аппаратами. Коэффициент эффективного полива был намного меньше агротехнической нормы. Коэффициенты избыточного и недостаточного полива были в два раза выше агротехнической нормы.

При $\phi = \lambda = 25$ м в зоне перекрытия наблюдается избыточный полив (рисунок 2.3). При такой площади полива средняя доза равна 4,8 кг/м$^2$. В центре рисунка и под аппаратами наблюдается зона недостаточного полива, а на линиях, соединяющих центры аппаратов по горизонтали и по вертикали, наблюдается избыточный полив.

Наибольший интерес представляет равномерность полива внутри квадрата, образованного линиями, соединяющими центры аппаратов (рисунок 2.4).

$Q := 1.2$ $M\rho := 11$ $\sigma\rho := 3$ $i := 0 .. 24$ $X_i := i + 0.5$

$j := 0 .. 24$ $Y_j := j + 0.5$ $B := 25$ $A := 25$ $T := 2500$




MD1

$V := stdev(MD1)$

$m := mean(MD1)$

$V = 2.353$

$H := \frac{V}{m} \cdot 100$

$H = 49.024$

$m = 4.799$

$Int := \begin{pmatrix} 0 \\ 1.2 \\ 2.4 \\ 3.6 \\ 4.8 \\ 6.0 \\ 7.2 \\ 8.4 \\ 9.6 \end{pmatrix}$ $n := hist(Int, MD1)$ $n = \begin{pmatrix} 52 \\ 81 \\ 72 \\ 76 \\ 92 \\ 156 \\ 68 \\ 28 \end{pmatrix}$

$Kef := \frac{(76 + 92)}{625}$ $Kef = 0.269$ $Knd := \frac{(52 + 81 + 72)}{625}$ $Knd = 0.328$

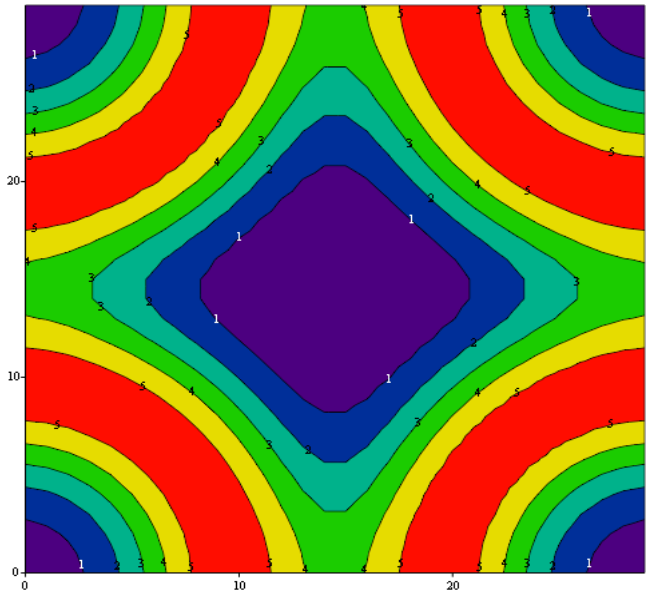
$\sum n = 625$ $Kiz := \frac{(156 + 68 + 28)}{625}$ $Kiz = 0.403$

Рисунок 2.4 – Расчет показателей равномерности полива на площади, орошаемой четырьмя аппаратами при $\phi = \lambda = 25$ м

Для оценки равномерности полива на этом квадрате вычислена матрица *MD1*, состоящая из двадцати пяти строк и двадцати пяти столбцов. Коэффициент вариации элементов матрицы оказался равным 49%, что очень плохо. Коэффициент избыточного полива оказался самым высоким (0,403), а коэффициент эффективного полива самым малым (0,269).

Увеличение расстояния между аппаратами до 30 метров (рисунок 2.5) привело к незначительному повышению коэффициента эффективного полива, коэффициент вариации дозы даже увеличился до 53%. Интуитивный подбор перекрытия между зонами орошения аппаратов трудоемок и даёт слабые результаты, поэтому требуется разработка программы оптимизации расстояний между аппаратами.

$$MD3_{i,j} := ZD3(X_i, Y_j)$$




MD3

$V3 := stdev(MD3)$ $V3 = 1.769$ $m3 := mean(MD3)$ $m3 = 3.332$

$$H3 := \frac{V3}{m3} \cdot 100 \qquad H3 = 53.078$$

$$Int := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.832 \\ 1.664 \\ 2.496 \\ 3.328 \\ 4.16 \\ 4.992 \\ 5.624 \end{pmatrix} \qquad n := hist(Int, MD3) \qquad n = \begin{pmatrix} 108 \\ 96 \\ 104 \\ 104 \\ 144 \\ 112 \\ 160 \end{pmatrix}$$

$$Kef := \frac{104 + 144}{828} \qquad Kef = 0.3 \qquad Knd := \frac{108 + 96 + 104}{828} \qquad Knd = 0.372$$

$$\sum n = 828 \qquad Kiz := \frac{112 + 160}{828} \qquad Kiz = 0.329$$

Рисунок 2.5 – Расчет показателей равномерности полива на площади, орошаемой четырьмя аппаратами при $\phi = l = 30$ м

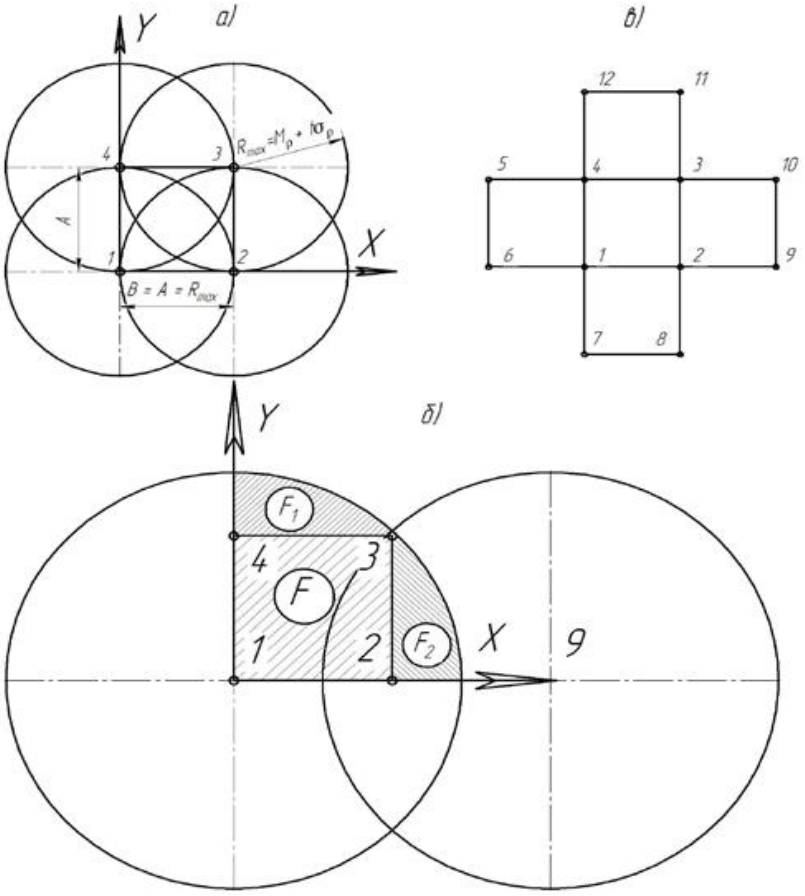



Рисунок 2.6 – Схемы построения моделей дождевания

Для выполнения оптимизации разработаны программы вычисления дозы на квадратах, ограниченных линиями, соединяющими точки расположения аппаратов (рисунок 2.6). Рассмотрим четыре аппарата. Если расстояние между позициями $\phi$ больше или равно (рисунок 2.6 *б*) максимальному радиусу дождевания, то на площадку *F*, ограниченную линиями, соединяющими точки 1, 2, 3, 4 расположения аппаратов, попадает вода только от четырех аппаратов. Количество её равно произведению расхода через один аппарат на время дождевания. На площадку *F* каждый аппарат выдает четвертую часть расхода, другие аппараты в дождевании площадки не участвуют. Модели для расчета дозы дождевания получаются сравнительно простыми, оценка равномерности полива всего поля такая, как и зачетной площадки *F*. Однако, как показали расчеты, получить распределение односопловым аппаратом в пределах допусков не удается.

При уменьшении расстояния между позициями (рисунок 2.6 *в*) зона дождевания аппарата выходит за пределы зачетной площадки. У первого аппарата появляются площадки $F_1$ и $F_2$, вода на которых дополняет полив смежных площадок, орошаемых с четвертой и девятой позиций (рисунок 2.6 *э*). Точную оценку равномерности дождевания зачетной площадки в этом случае необходимо выполнять с учетом работы двенадцати аппаратов по рисунку 2.6 *э*. Предварительную оценку можно выполнять по четырем ап-

паратам, но вычислять коэффициент полноты учета $K_y$, равный отношению суммы доз на зачетной площадке к произведению расхода через один аппарат на время полива. Чем меньше единицы этот коэффициент, тем менее надежна оценка равномерности.

Программа *MD(ϕ)* [62] (приложение А*)*, предназначена для вычисления дозы полива четырьмя односопловыми аппаратами, установленными в углах квадрата А×А.

Вывод результатов счета в виде матрицы показан на рисунке 2.7.

$$MD(10) = \begin{pmatrix} 21.824 & 22.937 & 23.589 & 23.807 & 23.826 & 23.826 & 23.807 & 23.589 & 22.937 & 21.824 \\ 22.937 & 24.56 & 25.58 & 26.079 & 26.249 & 26.249 & 26.079 & 25.58 & 24.56 & 22.937 \\ 23.589 & 25.58 & 26.955 & 27.725 & 28.042 & 28.042 & 27.725 & 26.955 & 25.58 & 23.589 \\ 23.807 & 26.079 & 27.725 & 28.703 & 29.131 & 29.131 & 28.703 & 27.725 & 26.079 & 23.807 \\ 23.826 & 26.249 & 28.042 & 29.131 & 29.619 & 29.619 & 29.131 & 28.042 & 26.249 & 23.826 \\ 23.826 & 26.249 & 28.042 & 29.131 & 29.619 & 29.619 & 29.131 & 28.042 & 26.249 & 23.826 \\ 23.807 & 26.079 & 27.725 & 28.703 & 29.131 & 29.131 & 28.703 & 27.725 & 26.079 & 23.807 \\ 23.589 & 25.58 & 26.955 & 27.725 & 28.042 & 28.042 & 27.725 & 26.955 & 25.58 & 23.589 \\ 22.937 & 24.56 & 25.58 & 26.079 & 26.249 & 26.249 & 26.079 & 25.58 & 24.56 & 22.937 \\ 21.824 & 22.937 & 23.589 & 23.807 & 23.826 & 23.826 & 23.807 & 23.589 & 22.937 & 21.824 \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.7 – Матрица результатов счета дозы при $\phi$ = 10

По матрице видно, что распределение очень равномерное, хотя перекрытие большое.

Программа *Kv*(*A*) (приложение Б) вычисляет по матрице доз коэффициент вариации.

Программа *Ke*(*A*)[61] (приложение В) вычисляет коэффициент эффективного полива по матрице доз.

Программа *Ke1(A)* (приложение Г) предназначена для вычисления коэффициентов недостаточного, эффективного и избыточного полива. Программа дополнена циклом изменения расстояния между позициями. Вывод результатов счета в виде матрицы и рисунка позволяет выбрать оптимальное расстояние между позициями аппаратов.

По рисунку 2.8 видно, что односопловый аппарат распределяет поливную воду в соответствии с агротехническими требованиями только при расстоянии между позициями менее 12,4 м. Вычисления выполнены при математическом ожидании дальностей полета капель 10 м и среднем квадратическом отклонении дальностей 3 м. Недостаточный полив под аппаратами устранен тем, что максимальная интенсивность смежного аппарата совпадает с точкой расположения соседнего. При расстоянии между аппаратами менее 10 м дозы полива на всех метровых площадках в зоне перекрытия входят в агротехнический допуск $M(1 \pm 0.25)$. Однако коэффициент полноты учета

менее 0,7, поэтому требуется разработать программу моделирования с двенадцати позиций.

Предварительно можно отметить возможность равномерного полива с помощью односопловых дождевальных аппаратов.

$$Ke(18) = \begin{pmatrix} 0.266 \\ 0.318 \\ 0.415 \\ 0.925 \end{pmatrix} \quad Ke(12) = \begin{pmatrix} 0.107 \\ 0.76 \\ 0.132 \\ 0.75 \end{pmatrix} \quad Ke(10) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0.535 \end{pmatrix}$$

$$i := 0..3 \quad j := 0..8 \quad A_j := j + 9 \quad M_{i,j} := Ke(A_j)_i \quad M_{4,j} := A_j$$

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.01 & 0.107 & 0.174 & 0.243 & 0.25 & 0.253 & 0.27 \\ 1 & 1 & 0.98 & 0.76 & 0.625 & 0.568 & 0.5 & 0.48 & 0.43 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.132 & 0.201 & 0.189 & 0.25 & 0.267 & 0.301 \\ 0.406 & 0.535 & 0.653 & 0.75 & 0.821 & 0.869 & 0.897 & 0.913 & 0.921 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 \end{pmatrix}$$

$i := 0..3$

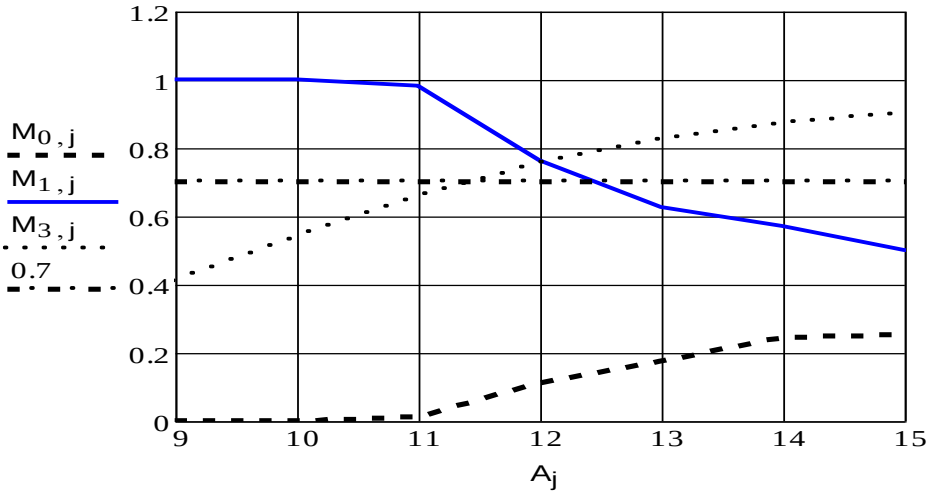



Рисунок 2.8 – Зависимость коэффициентов качества полива от расстояния между позициями односоплового аппарата

Обозначения на рисунке 2.8:

$M_{0,j}$ – коэффициент недополива;

$M_{1,j}$ – коэффициент эффективного полива;

$M_{3,j}$ – коэффициент полноты учета;

0,7 – агротехнический допуск качества полива.

Программа *MD12(ф)* предназначена для вычисления дозы полива двенадцатью одноструйными аппаратами, установленными в углах квадратов по рисунку 2.6 *а*. Зачетная площадка расположена между аппаратами 1, 2, 3, 4.

Программа *Ke12(A)* [63] (приложение Д) включает программу MD12(A) и по матрице доз выполняет вычисления коэффициентов Христиансена, не-

достаточного, эффективного и избыточного полива и коэффициента полноты учета. Программа дополнена циклом изменения расстояния между позициями. Вывод результатов счета в виде матрицы (рисунок 2.9) и рисунка 2.10 позволяет выбрать оптимальное расстояние между позициями аппаратов.

По матрице и рисунку видно, что одноструйный аппарат распределяет поливную воду в соответствии с агротехническими требованиями только при расстоянии между позициями менее 13,4 м. Коэффициент Христиансена при этом около 80%. Вычисления выполнены при математическом ожидании дальностей полета капель 10 м и среднем квадратическом отклонении дальностей – 3 м. Недостаточный полив под аппаратами устранен тем, что максимальная интенсивность смежного аппарата почти совпадает с точкой расположения соседнего. При расстоянии между аппаратами менее 13,4 м дозы полива на всех метровых площадках в зоне перекрытия входят в агротехнический допуск $M(1\pm0{,}25)$. Коэффициент полноты учета равен 0,997, что свидетельствует о полном учете поступления воды на учетную площадку от двенадцати аппаратов. Возможность равномерного полива с помощью одноструйных дождевальных аппаратов доказана, но расстояние между позициями близко к радиусу зоны орошения.

$$i := 0..4 \quad j := 0..8 \quad A_j := j + 9 \quad M_{i,j} := Ke12(A_j)_i \quad M_{5,j} := A_j$$

$$M = \begin{pmatrix} 96.448 & 96.738 & 98.251 & 91.012 & 83.152 & 76.818 & 72.146 & 67.974 & 64.464 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.071 & 0.204 & 0.231 & 0.297 & 0.304 \\ 1 & 1 & 1 & 0.972 & 0.781 & 0.571 & 0.516 & 0.469 & 0.346 \\ 0 & 0 & 0 & 0.028 & 0.148 & 0.224 & 0.253 & 0.234 & 0.349 \\ 0.976 & 0.991 & 0.997 & 0.999 & 0.999 & 0.999 & 0.999 & 0.999 & 0.999 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} CDU \\ Knd \\ Kef \\ Kiz \\ Ky \\ A \end{pmatrix}$$

Рисунок 2.9 – Матрица результатов счета показателей равномерности распределения воды одноструйным аппаратом

Обозначения на рисунках 2.9 и 2.10 записаны справа от матрицы счета:

$M_{0,j}$ – коэффициент Христиансена;

$M_{1,j}$ – коэффициент недополива;

$M_{2,j}$ – коэффициент эффективного полива;

$M_{3,j}$ – коэффициент избыточного полива;

$M_{4,j}$ – коэффициент полноты учета;

0,7 – агротехнический допуск эффективного полива.

По рисункам 2.9 и 2.10 видно, что коэффициент полноты учета очень близок к единице. Коэффициент эффективного полива равен 0,7 при шаге установки 13,4 м, что на один метр больше, чем по оценке только по четырем позициям.

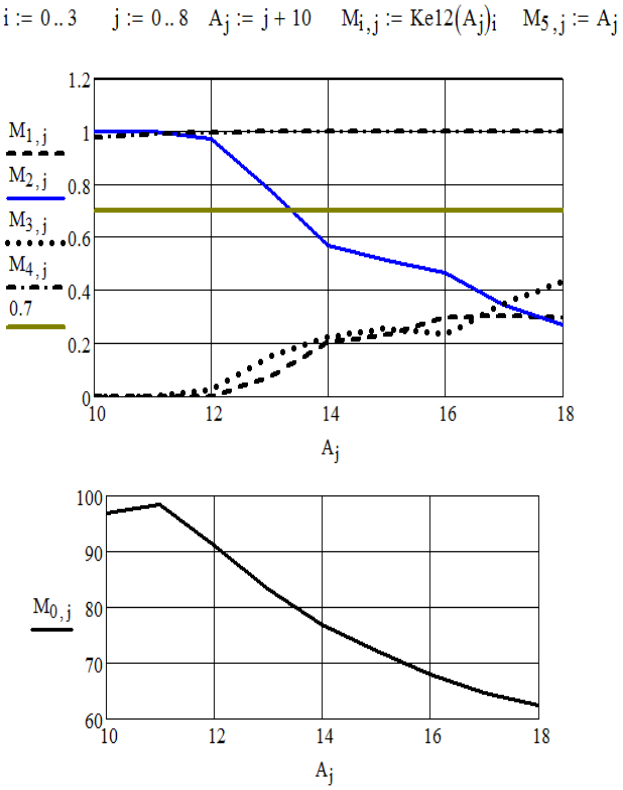



Рисунок 2.10 – Зависимость коэффициентов качества полива от расстояния между позициями одноструйного аппарата

Коэффициент эффективного полива 0,7 и коэффициент равномерности по Христиансену 0,8 получаются при шаге установки аппаратов 13,5 м.

Далее выполнено моделирование работы двухсоплового аппарата типа «Роса-3». Приняты следующие исходные данные: $Q = 8$ л/с; $m_{\rho 1} = 15$ г; $\sigma_{\rho 1} = 5$ г; $m_{\rho 2} = 7$ г; $\sigma_{\rho 2} = 2$ г; $k_1 = 0{,}7$; $k_2 = 0{,}3$.

Моделирование работы одного аппарата выполнено по формулам (2.1), (2.2), (2.7). Модели трех других аппаратов (рисунок 2.11) выполнены смещением координат согласно рисункам 2.2 и 2.6.

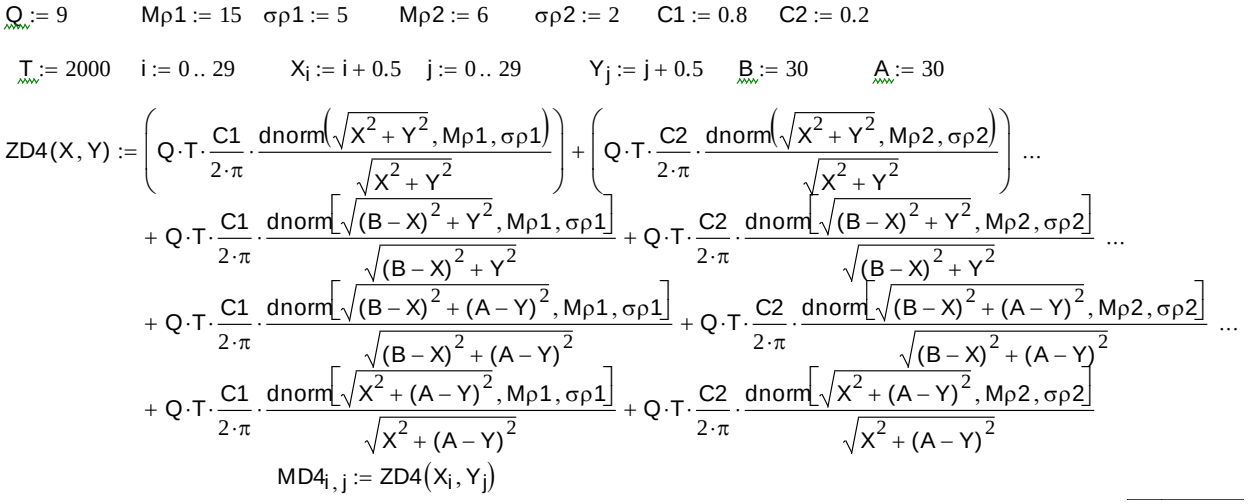



Рисунок 2.11 – Программа расчета доз внесения удобрений двухсопловым аппаратом на четырех позициях

Программа *D*1(*A*) (приложение Е) вычисляет матрицу доз двухсопловым аппаратом.

Подбор весовых коэффициентов, характеризующих соотношение расходов через основное и дополнительное сопла, выполнен смешением двух

законов нормального распределения (рисунок 2.12). По рисунку отмечено, что равенство максимумов плотности вероятностей от двух сопел наступает при

$$C_1 = 0{,}75...0{,}8; \text{ и } C_2 = 0{,}25...0{,}2 .$$

M1 := 15  σ1 := 5  M2 := 6  σ2 := 2  C1 := 0.8  C2 := 0.2

f(ρ) := C1·dnorm(ρ, M1, σ1) + C2·dnorm(ρ, M2, σ2)

ρ := 0, 0.5.. 30

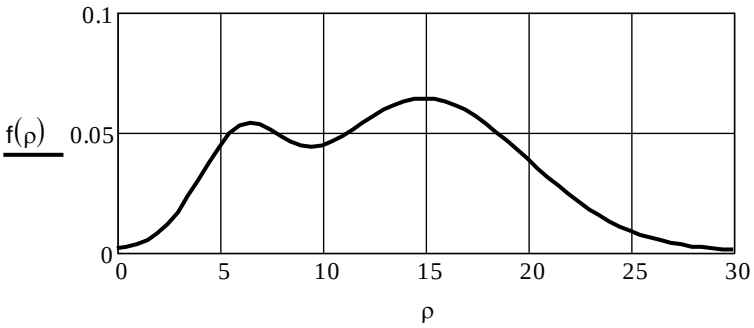



Рисунок 2.12 – Пример обоснования весовых коэффициентов основного и дополнительного сопла

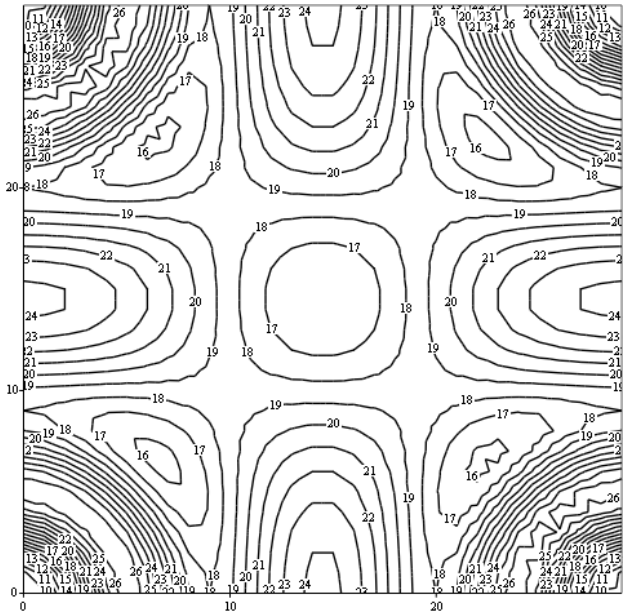
По линиям равных доз полива (рисунок 2.13) можно отметить повышение равномерности полива. Средняя доза полива при $\phi = \lambda = 30$ м равна 20 кг/м$^2$.

На горизонтальных и вертикальных линиях, соединяющих центры вращения аппаратов, наблюдается избыточный полив, а на пересечении диагоналей – недостаточный полив. Числовые оценки равномерности показали, что коэффициент вариации доз равен 16%, коэффициент эффективного полива – 0,893; коэффициент избыточного полива – 0,08; коэффициент недостаточного полива – 0,027.

Программа *Ke*2(*A*) (приложение Ж) предназначена для оптимизации расстояний между позициями двухсопловых аппаратов по критериям равномерности.

Применение дополнительного сопла для выравнивания распределения воды по радиусам оказалось эффективным, получен наилучший результат моделирования.

Для оптимизации расстояний между аппаратами по критериям равномерности составлена программа *Ke2S12(A)* (приложение 3).



$\max(MD4) = 26.899$

$\min(MD4) = 9.404$

MD4

$V4 := \text{stdev}(MD4)$ $V4 = 3.2$ $m4 := \text{mean}(MD4)$ $m4 = 19.96$

$$H4 := \frac{V4}{m4} \cdot 100 \qquad H4 = 16.034$$

$$Int := \begin{pmatrix} 9 \\ 10 \\ 15 \\ 20 \\ 25 \\ 30 \end{pmatrix} \qquad n := \text{hist}(Int, MD4) \qquad n = \begin{pmatrix} 12 \\ 12 \\ 472 \\ 332 \\ 72 \end{pmatrix} \qquad \sum n = 900$$

$$Kef := \frac{472 + 332}{900} \qquad Kef = 0.893 \qquad Knd := \frac{12 + 12}{900} \qquad Knd = 0.027$$

$$\sum n = 900 \qquad Kiz := \frac{72}{900} \qquad Kiz = 0.08$$

Рисунок 2.13 – Расчет показателей равномерности распределения воды двухсопловым дождевальным аппаратом

Результаты счета показаны на рисунке 2.14. Коэффициент эффективного полива более 0,7 при шаге установки аппаратов менее 37 м. Равномерность по Христиансену – более 80% в этом же диапазоне расстояний между аппаратами.

Моделирование распределения воды односопловыми аппаратами показало сложность обеспечения равномерного распределения по площади полива. Интуитивный подбор расстояния между позициями трудоемок, поэтому разработана программа оптимизации этого параметра.

Равномерность распределения воды двухсопловым аппаратом можно достигнуть оптимизацией весовых коэффициентов сопел и числовых характеристик дальностей полета капель. В примере моделирования получен ко-

эффициент вариации доз 16% и коэффициент эффективного полива 0,893, что очень хорошо.

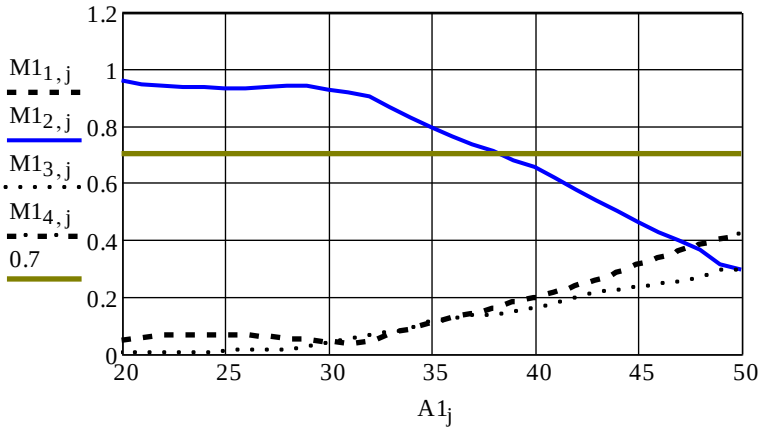
Методика моделирования распределения воды дождевальными аппаратами может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих машин. Рассмотренные примеры можно применить для оптимизации размещения аппаратов на машинах «Волжанка» и «Днепр».

M1 =

| | 18 | 19 | 20 | 21 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 81.812 | 80.406 | 78.792 | 76.959 |
| 1 | 0.158 | 0.179 | 0.194 | 0.215 |
| 2 | 0.711 | 0.679 | 0.654 | 0.616 |
| 3 | 0.131 | 0.143 | 0.151 | 0.169 |
| 4 | 1.777 | 1.797 | 1.818 | 1.838 |
| 5 | 38 | 39 | 40 | 41 |

$\begin{pmatrix} CDU \\ Knd \\ Kef \\ Kiz \\ Ky \\ A \end{pmatrix}$

$i := 0..3 \quad j := 0..30 \quad A1_j := j + 20 \quad M1_{i,j} := Ke2S12(A1_j)_i \quad M1_{5,j} := A1_j$



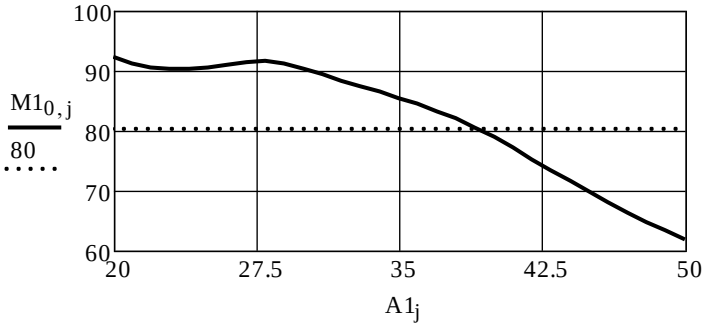




Рисунок 2.14 – Показатели равномерности распределения воды двухсопловым аппаратом при $\int_{\rho 1} = 15 дз \quad \sigma_{\rho 1} = 5 дз \quad \int_{\rho 2} = 7 дз;$

$\sigma_{\rho 2} = 2 дз \quad и_1 = 0,7; \quad и_2 = 0,3$

## 2.2. Моделирование процесса дождевания дальнеструйными аппаратами при работе по сектору

В настоящем разделе предложены методики и программы математического моделирования процессов распределения воды дальнеструйными дождевальными аппаратами, установленными на машине позиционного действия или стационарно [64, 65, 66].

Моделирование выполняем при допущении о равномерном вращении аппаратов в пределах заданного сектора. За один цикл импульсного движения перемещение значительно меньше размера зоны дождевания, поэтому после наложения зон дождевания распределение воды получается таким, как и при равномерном непрерывном вращении аппарата.

Построим математическую модель процесса при следующих допущениях: распределение дождя по углу сектора известно и задано плотностью вероятностей угла *f(Ŭ)* и расходом *Q* так, что плотность потока воды, приходящегося на единицу угла, равна $q_{\check{U}} = Q\bar{A}(\check{U})$; распределение дальности полета капель по радиусам известно и задано плотностью вероятностей дальностей *f(Ɉ);* расход *Q* считаются постоянным, скорость ветра равна нулю; высота установки аппаратов постоянна; поверхность поля горизонтальна.

Пусть аппарат находится в центре системы координат *XOY* (рисунок 2.14) и работает по сектору. Положение площадки *dF* , как и ранее, задаем в прямоугольных и в полярных координатах. Вероятность попадания жидкости на элементарную площадку *dF,* выделенную в зоне дождевания двумя радиусами с углом между ними $d\alpha$ и двумя окружностями с приращением радиуса $d\rho$, определится как произведение вероятностей попадания в диапазон угла $d\alpha$ и радиуса $d\rho$, т.е.

$$t\{dF\} = f(\alpha)\cdot d\alpha \cdot f(\rho)d\rho .$$

Интенсивность дождя на площадке равна количеству воды, попадающей на нее в единицу времени, деленному на ее площадь, определяем по формуле (2.1).

Доза полива любой площадки стационарным аппаратом определяется произведением интенсивности на время работы по формуле (2.2).

Прямоугольные координаты площадки *dF* связаны с полярными соотношениями (2.3).

Струя воды в полете испытывает возмущающие воздействия со стороны воздуха. Это приводит к разбросу дальностей полета капель, в радиальном, и в тангенциальном направлениях. Разброс дальностей в тангенциальном направлении проявляется на краях зоны дождевания, то есть при крайних положениях аппарата. В средних положениях тангенциальный разброс

дальностей сглаживается. Учесть тангенциальный разброс можно композицией равномерного и нормального законов распределения (рисунок 2.15).

$-A\alpha \le \alpha 2 \le A\alpha \quad M\alpha 1 := 0 \quad \sigma\alpha 1 := 0.4 \quad A\alpha := 1.2 \quad i := 0, 1 .. 30 \quad \alpha_i := i \cdot 0.1 - 1.5$

$$f(\alpha) := \frac{1}{2 \cdot A\alpha} \cdot \left( pnorm\left( \frac{A\alpha - \alpha + M\alpha 1}{\sigma\alpha 1}, M\alpha 1, \sigma\alpha 1 \right) - pnorm\left( \frac{-A\alpha - \alpha + M\alpha 1}{\sigma\alpha 1}, M\alpha 1, \sigma\alpha 1 \right) \right)$$

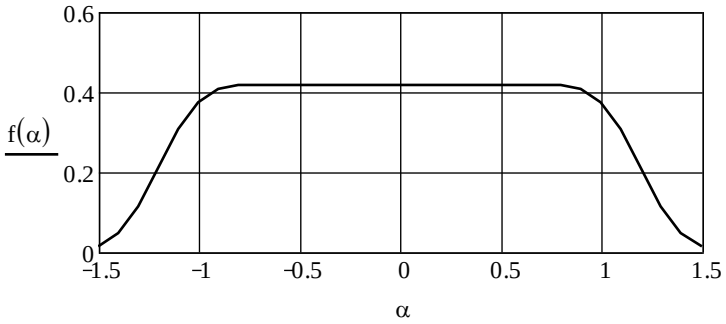



Рисунок 2.15 – Моделирование плотности вероятностей угла расположения струи в виде композиции законов распределения

Угол расположения струи представлен в виде суммы двух векторов. Первый имеет нормальное распределение с числовыми характеристиками $M_{\alpha 1} = 0 ; \sigma_{\alpha 1}$. Второй – распределен равномерно в пределах угла от минус $A_\alpha$ до плюс $A_\alpha$, где $A_\alpha$ – амплитуда колебаний угла. Струйный аппарат при работе по сектору вращается равномерно, следовательно, все значения угла равновероятны и плотность вероятностей второго угла определяется формулой

$$f(\alpha_2) = \frac{1}{2 \cdot A_\alpha}. \qquad (2.7)$$

Композиция законов равномерного и нормального распределений задана формулой (2.8).

Распределение характеризуется тремя параметрами: односторонним интервалом $A_\alpha$ равномерного распределения, математическим ожиданием $M_{\alpha 1}$ вектора случайного рассеивания, принимаемым равным нулю, и средним квадратическим отклонением $\sigma_{\alpha 1}$ этого вектора.

$$f(\alpha) = \frac{1}{2 \cdot A_\alpha} \left( pnorm\left( \frac{A_\alpha - \alpha + M_{\alpha 1}}{\sigma_{\alpha 1}}, M_{\alpha 1}, \sigma_{\alpha 1} \right) - pnorm\left( \frac{-A_\alpha - \alpha + M_{\alpha 1}}{\sigma_{\alpha 1}}, M_{\alpha 1}, \sigma_{\alpha 1} \right) \right), \qquad (2.8)$$

где *tnorm ï* стандартная функция нормального распределения.

В средней части результат сложения двух векторов (рисунок 2.15) не приводит к отклонению от равномерного распределения. Плавный спад

плотности вероятностей $f(\alpha)$ на краях сектора зависит от среднего квадратического отклонения $\sigma_{\alpha 1}$, принимаемого по результатам опытов.

Плотность вероятностей дальностей полета капель от аппарата с одним соплом аппроксимируется нормальным законом распределения.

$$f(\rho) = \frac{1}{\sigma_\rho \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp(-\frac{(\rho - M_\rho)^2}{2 \cdot \sigma_\rho^2}), \qquad (2.9)$$

где $\rho$ – дальность полета капель;

$M_\rho, \sigma_\rho$ – числовые характеристики дальностей полета капель.

Плотность вероятностей дальностей полета капель от аппарата с двумя соплами определяется по формуле

$$f(\rho) = \frac{и_1}{\sigma_{\rho 1} \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp(-\frac{(\rho - M_{\rho 1})^2}{2 \cdot \sigma_{\rho 1}^2}) + \frac{и_2}{\sigma_{\rho 2} \sqrt{2 \cdot \pi}} \exp(-\frac{(\rho - M_{\rho 2})^2}{2 \cdot \sigma_{\rho 2}^2}, \qquad (2.10)$$

где $C_1, C_2$ – весовые коэффициенты;

$M_{\rho 1}, \sigma_{\rho 1}$ – числовые характеристики дальностей полета от первого сопла;

$M_{\rho 1}, \sigma_{\rho 1}$ – числовые характеристики дальностей от второго сопла.

Весовые коэффициенты и числовые характеристики дальностей полета капель подбираются при моделировании по условию наиболее равномерного распределения воды по радиусам или по площади дождевания.

По формулам (2.2)–(2.10) составлена программа *Z4(X,Y)* (приложение И) вычисления дозы дождевания после работы аппарата на четырех позициях.

По технической характеристике аппарата ДД-30 приняты следующие исходные данные:

$M_{\rho 1} = 30$ dz; $\sigma_{\rho 1} = 10$ dz; $M_{\rho 2} = 5$ dz; $\sigma_{\rho 2} = 1{,}6$ dz; $C_1 = 0{,}85$;

$C_2 = 0{,}15$; $Q = 30$ dz/ fn; $\alpha_{\min} = -1{,}2$ tcOn; $\alpha_{\max} = 1{,}2$ tcOn.

Для проверки работы программы моделирования распределения воды с четырех позиций расстояния ($\phi$ = 90 м и $l$ = 50 м) выбраны больше размеров зоны дождевания. Тогда изогиеты от отдельных позиций не перекрываются (рисунок 2.16).

Моделирование перекрытия зон дождевания выполнено путем изменения расстояний между позициями. Линии уровней доз полива от отдельных позиций суммируются и получено общее распределение, которое оказалось более равномерным (рисунок 2.17).

Для оценки равномерности полива выделили площадь размерами $A \times B$ в зоне перекрытия и вычислили дозы на метровых делянках. Результаты записаны в матрицу *MD5*. По матрице построен контурный график доз (изогиеты) (рисунок 2.18). По матрице вычислены среднее квадратическое отклоне-

ние, средняя доза и коэффициент вариации доз, который оказался на приемлемом уровне – 21,1%.

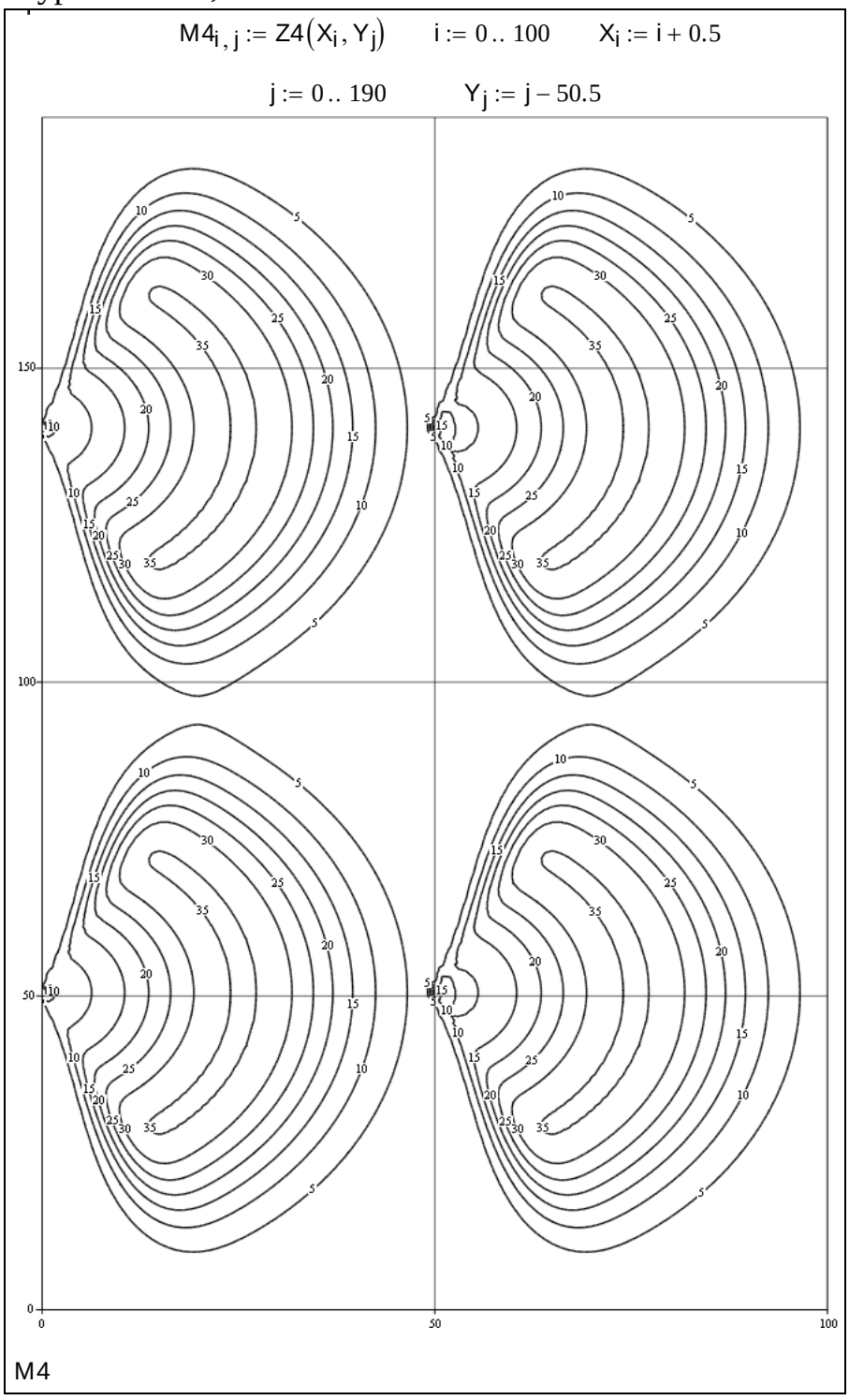



Рисунок 2.16 – Моделирование распределения воды дальнеструйным аппаратом с четырех позиций при $\phi$ = 90 м; $\Lambda$ = 50 м при работе по сектору

Далее вычислены граничные дозы области эффективного полива. Границы классов рассчитаны начиная от средней дозы. Зона эффективного полива ограничена пределами $q_{Fsr} \pm 0{,}25 \cdot q_{Fsr}$. Классовые промежутки выбраны

равными $0{,}25 \cdot q_{Fsr}$. Частоту классов вычислили по стандартной программе Mathcad – *hist*. Два верхних класса характеризуют зону недостаточного полива, два следующих – зону эффективного полива, и последний класс – зону избыточного полива. Показатели равномерности оказались приемлемыми. По агротехническим требованиям коэффициент эффективного полива должен быть не менее 0,7, фактически получен – 0,758.

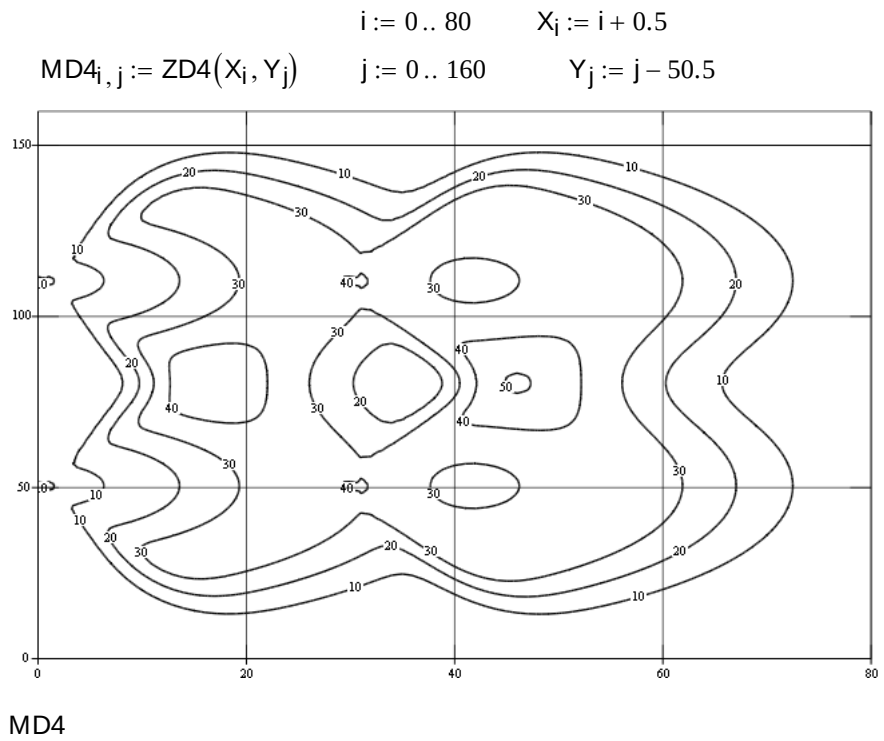



Рисунок 2.17 – Моделирование перекрытия зон дождевания при $\phi$ = 60 м; $\lambda$ = 30 м

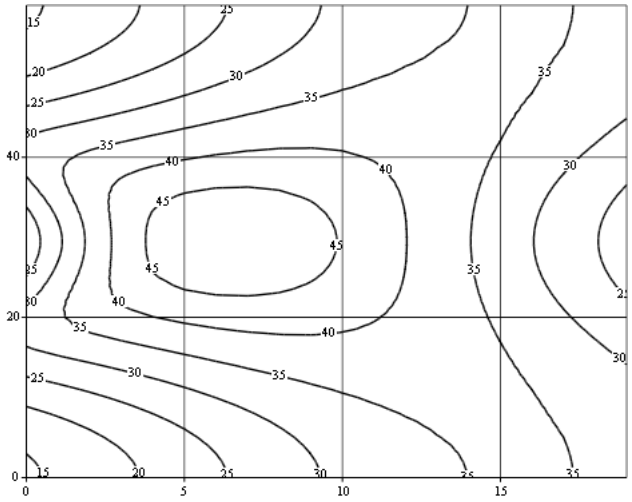
В центре рисунка 2.17 наблюдается зона избыточного полива. Её можно уменьшить увеличением расстояния А, но слева при этом увеличится недополив, который можно устранить вспомогательным соплом.

Программа моделирования распределения воды двухсопловым аппаратом *ZS2(X,Y)* (приложение К) отличается от программы *Z4(X,Y)* тем, что распределения от двух сопел суммируются с весовыми коэффициентами $C_1$ и $C_2$, сумма которых должна равняться единице. Если одному из них присвоить значение, равное единице, а другому – нулю, то получим распределение односопловым аппаратом. Этот прием можно использовать для проверки работоспособности программы.

Перекрытия моделируются выбором значений расстояний между позициями $A$ и $B$. На контурных графиках дозы полива (рисунок 2.19) при отсутствии перекрытий наблюдаются две широких полосы, середины которых соответствуют математическим ожиданиям дальностей полета капель струи основного и дополнительного сопел.

Моделирование перекрытий выполнено согласно рисунку 2.20 [62].

$$MD5_{i,j} := ZD5(X_i, Y_j)$$



MD5

stdev(MD5) = 7.063

mean(MD5) = 33.471

$$Var := \frac{stdev(MD5)}{mean(MD5)} \cdot 100$$

Var = 21.101

min(MD5) = 14.208

max(MD5) = 49.436

(33.47·0.25) = 8.367

$$Int := \begin{pmatrix} 6.36 \\ 14.73 \\ 25.1 \\ 33.47 \\ 41.84 \\ 50.21 \end{pmatrix} \qquad n := hist(Int, MD5) \qquad n = \begin{pmatrix} 6 \\ 148 \\ 366 \\ 544 \\ 136 \end{pmatrix} \qquad \sum n = 1.2 \times 10^3$$

$$Kef := \frac{366 + 544}{1200} \qquad Kef = 0.758 \qquad Knd := \frac{6 + 148}{1200} \qquad Knd = 0.128$$

$$Kiz := \frac{136}{1200} \qquad Kiz = 0.113$$

Рисунок 2.18 – Расчет показателей равномерности полива на площади $60 \times 20$ односопловым аппаратом

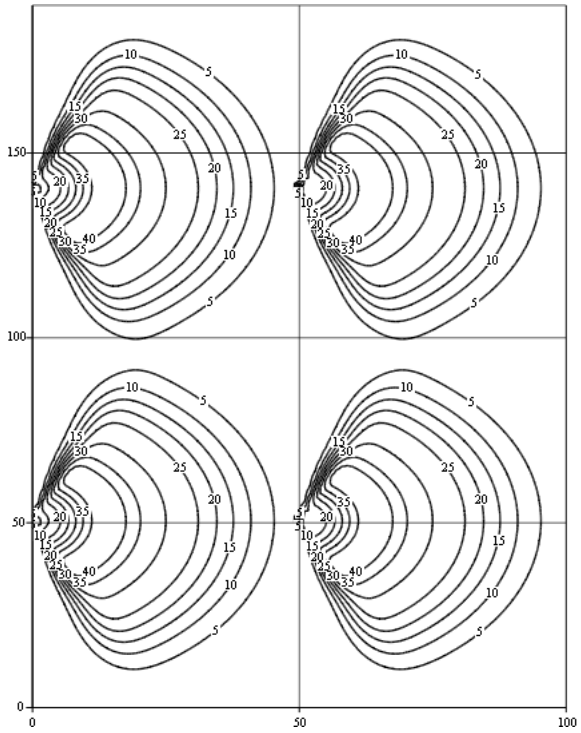
По рисунку 2.20 видно, что по оси X перекрытие избыточное. Расстояние B можно увеличить, хотя имеются площадки с недостаточным поливом.

На рисунке 2.21 приведены расчеты показателей качества полива. Коэффициент эффективного полива оказался выше допускаемого по агротехническим требованиям, что положительно. Коэффициент недостаточного полива оказался выше 0,15, а коэффициент избыточного полива оказался совсем малым.

Моделирование распределения воды дальнеструйным аппаратом на четырех позициях не дает объективной оценки качества распределения, так как выбор площади для вычисления показателей несколько субъективен. Так, по рисунку 2.21 эта площадь смещена от начала координат на 20,5 метров. Полной уверенности в перекрытии зон полива от следующих позиций нет.

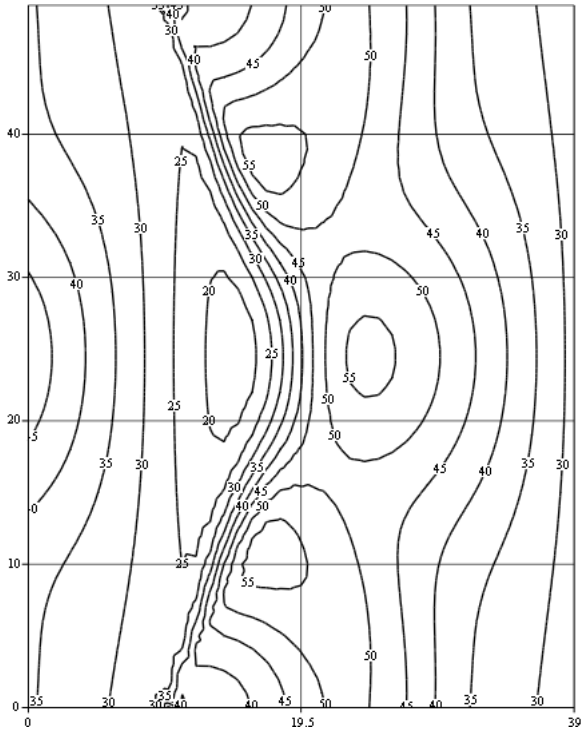
$MS2_{i,j} := ZS2(X_i, Y_j)$ C1 := 0.8 C2 := 0.2 $i := 0 .. 39.5$ $X_i := i + 20.5$ $j := 0 .. 49$ $Y_j := j + 0.5$

$i := 0 .. 100$ $X_i := i + 0.5$ $j := 0 .. 190$ $Y_j := j - 50.5$ $MS22_{i,j} := ZS21(X_i, Y_j)$ C1 := 0.8 C2 := 0.2




MS2

Рисунок 2.19 – Контурные графики дозы полива двухсопловым аппаратом без перекрытий




MS22

Рисунок 2.20 – Контурные графики дозы полива при $\phi = 50$ и $l = 40$ м

stdev(MS22) = 9.482

mean(MS22) = 38.528 $Var22 := \frac{stdev(MS22)}{mean(MS22)} \cdot 100$ Var22 = 24.609

min(MS22) = 17.551 max(MS22) = 57.631 mean(MS22) = 38.528

$38.538 \cdot 0.25 = 9.634$ $38.528 - 9.634 = 28.894$ $38.528 + 9.634 = 48.162$

$i := 0 .. 5$ $Int_i := 9.626 + i \cdot 9.634$

$$Int = \begin{pmatrix} 9.626 \\ 19.26 \\ 28.894 \\ 38.528 \\ 48.162 \\ 57.796 \end{pmatrix}$$

$n := hist(Int, MD5)$ $$n = \begin{pmatrix} 48 \\ 228 \\ 680 \\ 226 \\ 18 \end{pmatrix}$$

$Kef := \frac{680 + 226}{1200}$ Kef = 0.755 $\sum n = 1.2 \times 10^3$

$Knd := \frac{48 + 228}{1200}$ Knd = 0.23 $Kiz := \frac{18}{1200}$ Kiz = 0.015

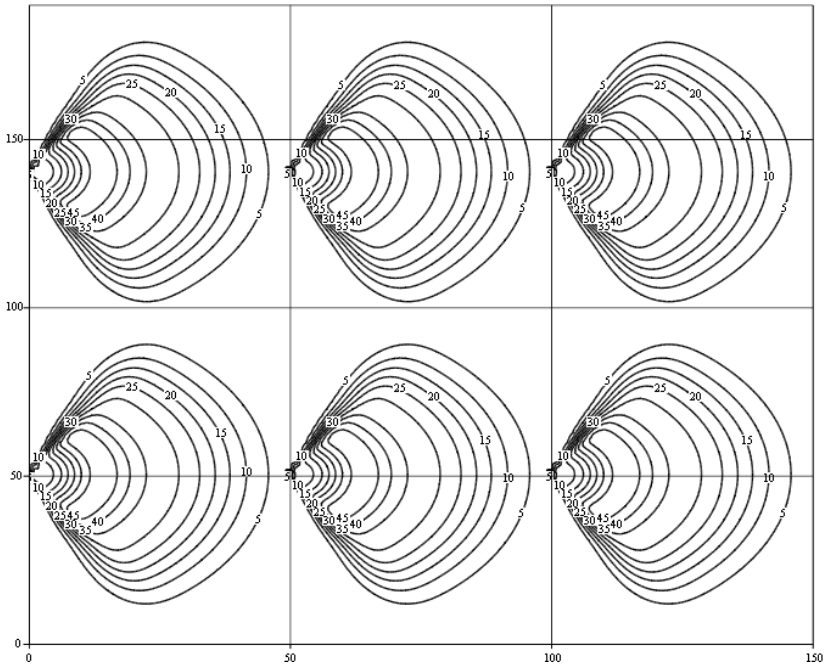
Рисунок 2.21 – Расчет показателей качества полива двухсопловым аппаратом

Моделирование распределения на шести позициях дает уверенный результат оценки качества полива (рисунок 2.22).

Программа *ZS2P6* (приложение Л) моделирует распределение воды двумя соплами с шести позиций.

$i := 0 .. 150 \quad X_i := i + 0.5 \quad j := 0 .. 190 \quad Y_j := j - 50.5$

$MS2P6_{i,j} := ZS2P6(X_i, Y_j) \quad C1 := 0.8 \quad C2 := 0.2$



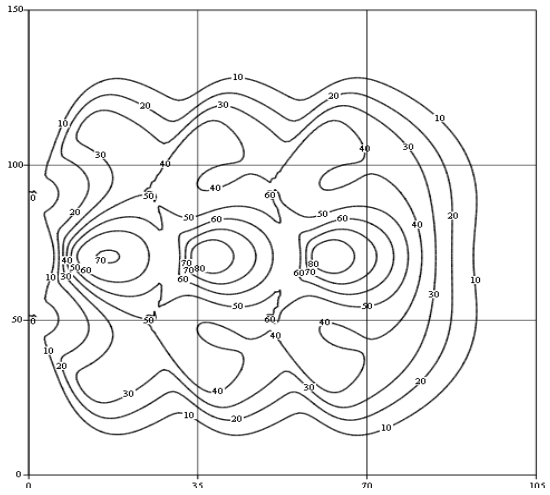
MS2P6

Рисунок 2.22 – Моделирование распределения воды аппаратами с шести позиций

Результат расчета по программе *ZS2P6(X,Y)* показан на рисунках 2.23 и 2.24.

$i := 0 .. 105 \quad X_i := i + 0.5 \quad j := 0 .. 150 \quad Y_j := j - 50.5$

$MS2P63_{i,j} := ZS2P63(X_i, Y_j) \quad C1 := 0.8 \quad C2 := 0.2$



MS2P63

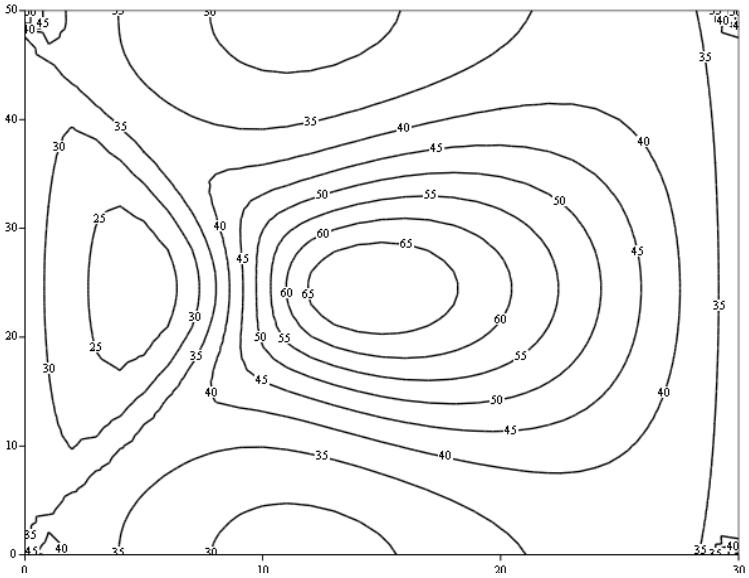
Рисунок 2.23 – Контурный график распределения воды дальнеструйным аппаратом с шести позиций

По рисунку 2.24 получены коэффициенты эффективного полива – 0,710, недостаточного полива – 0,116, избыточного полива – 0,175.

Выполнение агротехнических требований при секторном поливе возможно, но требуется большой объем численного эксперимента.

$i := 0 .. 30 \qquad X_i := i + 30.5 \qquad j := 0 .. 50 \qquad Y_j := j + 0.5$

$MS2P66_{i,j} := ZS2P65(X_i, Y_j) \qquad C1 := 0.8 \qquad C2 := 0.2$




MS2P66

Рисунок 2.24 – Контурный график распределения воды дальнеструйным аппаратом в середине шести позиций на площади $\phi$ = 50 м и $J$ = 30 м

## 2.3. Оптимизация расстояний между позициями среднеструйных аппаратов

Моделирование распределения воды среднеструйными и дальнеструйными аппаратами кругового действия показало, что важнейшим условием равномерного распределения является перекрытие зон полива от смежных аппаратов [67, 68]. Интуитивно подобрать оптимальное перекрытие затруднительно, скорее даже невозможно. Выполнение оптимизации возможно только при разработке специальных процедур поиска минимума или максимума.

Для выполнения оптимизации шага установки аппаратов рекомендуется использовать программы *MD*12(*A*) [62] вычисления дозы на квадратах, ограниченных линиями, соединяющими точки расположения аппаратов и программу *Ke*12(*A*) [63]. Примеры оптимизации шага установки аппаратов приведены на рисунках 2.8, 2.10, 2.13, 2.14. Расчеты выполнены при постоянных значениях числовых характеристик дальностей полета частиц и постоянном соотношении расходов через основное и дополнительное сопла. Ана-

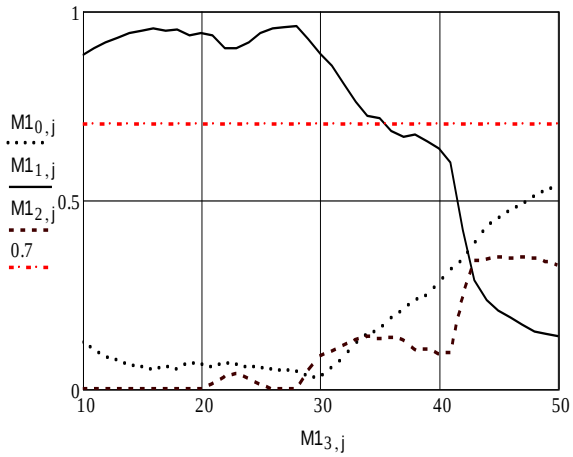
логичные расчеты можно выполнить при других значениях исходных данных. Процедура оптимизации сравнительно проста.

Двухсопловый аппарат при $M\rho 1 = 15;\ \sigma\rho 1 = 5;\ \ M\rho 2 = 6;\ \sigma\rho 2 = 2;$ распределяет воду в соответствии с агротехническими требованиями при расстоянии между аппаратами менее 35 метров (рисунок 2.25). Максимальное расстояние между аппаратами, при котором выполняются агротехнические требования, назовем эффективным.

$i := 0..2 \quad j := 0..40 \quad A_j := j + 10 \quad M1_{i,j} := KD1(A_j)_i \quad M1_{3,j} := A_j$

$M1 =$

| | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.115 | 0.142 | 0.154 | 0.182 | 0.205 | 0.229 |
| 1 | 0.757 | 0.72 | 0.715 | 0.682 | 0.666 | 0.671 |
| 2 | 0.129 | 0.138 | 0.131 | 0.136 | 0.129 | 0.1 |
| 3 | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 |




$M1_{0,j}$ – коэффициент недополива; $M1_{1,j}$ – коэффициент эффективного полива; $M1_{2,j}$ – коэффициент избыточного полива; 0,7 – агротехнический допуск качества полива

Рисунок 2.25 – Зависимость коэффициентов качества полива от расстояния между позициями двухсоплового аппарата при работе по кругу

У односоплового аппарата эффективное расстояние всего в 1,2 раза больше математического ожидания дальностей полета капель. У двухсоплового аппарата это расстояние в 2,33 раза больше чем математическое ожидание дальностей полета капель от основного сопла $M\rho 1$.

Сложнее оптимизация расстояний между аппаратами для дальнеструйных аппаратов, работающих по сектору. В этом случае $A \neq B$, кроме того, можно оптимизировать параметры $M\rho 1;\ M\rho 2;\ C1;\ C2$. Выполнить такую задачу можно методом перебора, либо методом планирования многофакторного вычислительного эксперимента.

Более сложным является вопрос о выборе зачетной площадки при оценке равномерности дождевания. Зачетная площадка должна быть такой, чтобы коэффициент полноты учета был близок к единице. На рисунке 2.26

показаны зоны дождевания шести аппаратов секторного действия при отсутствии перекрытий. На площадь, ограниченную точками установки аппаратов 2, 3, 6, 5 при отсутствии перекрытия попадает вода от второго и от третьего аппаратов. Коэффициент полноты учета равен единице, так как половина расхода от каждого аппарата приходится на эту площадь.

Граница зоны дождевания в направлении оси X определяется по правилу трех сигм, то есть

$$Ro = M\rho 1 + 3 \cdot \sigma\rho 1 .$$

Границу зоны дождевания в направлении оси Y определим по формуле

$$by = Ro \cdot \sin(A\alpha) .$$

Шаг установки по оси Y обозначен A, по оси X – B.

Если $A > 2by$, то поперечного перекрытия нет. Если $A < by$, то часть воды от второго и от третьего аппаратов попадает за пределы зачетной площади, коэффициент полноты учета снижается. Для полного учета необходимо моделировать работу аппаратов, расположенных выше и ниже второго и третьего.

Если $B > Ro$, то нет продольного перекрытия зон дождевания. Если $B < Ro$, то часть воды от второго и третьего аппаратов попадает за пределы зачетной площади. Однако коэффициент полноты учета по этой причине не снизится, так как такое же количество воды попадет на зачетную площадь от первого и от четвертого аппаратов (рисунок 2.27).

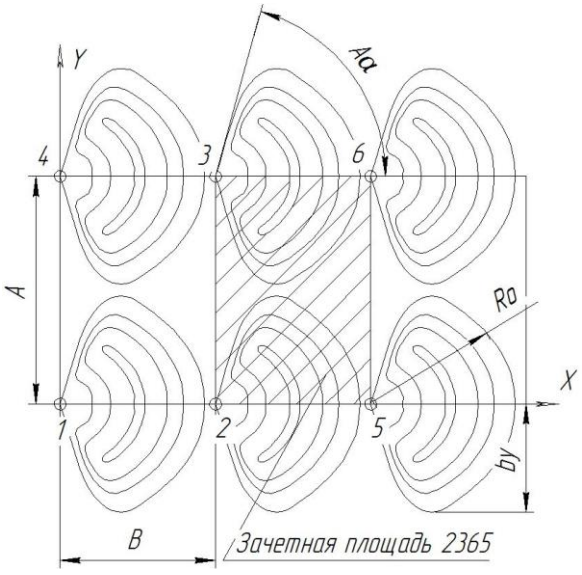



Рисунок 2.26 – К выбору зачетной площади при секторном поливе

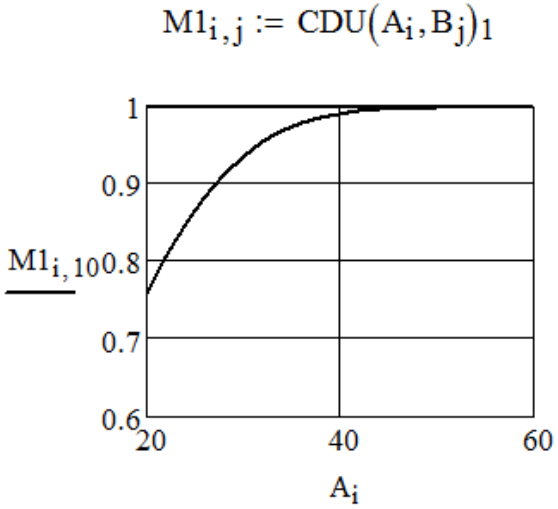



Рисунок 2.27 – График зависимости коэффициента полноты учета от расстояния A

Программа *KD2(A)* вычисляет коэффициент эффективного полива при различных значениях расстояний $\phi$. Расстояние $J$, между позициями по

направлению струи, вводится внутри программы. Результаты расчетов показаны на рисунках 2.28 – 2.31. Вычисления выполнены при

$$M_{\rho 1} = 30\ дБ;\ \sigma_{\rho 1} = 10\ дБ;\ M_{\rho 2} = 5\ дБ;\ \sigma_{\rho 2} = 1{,}6\ дБ;$$

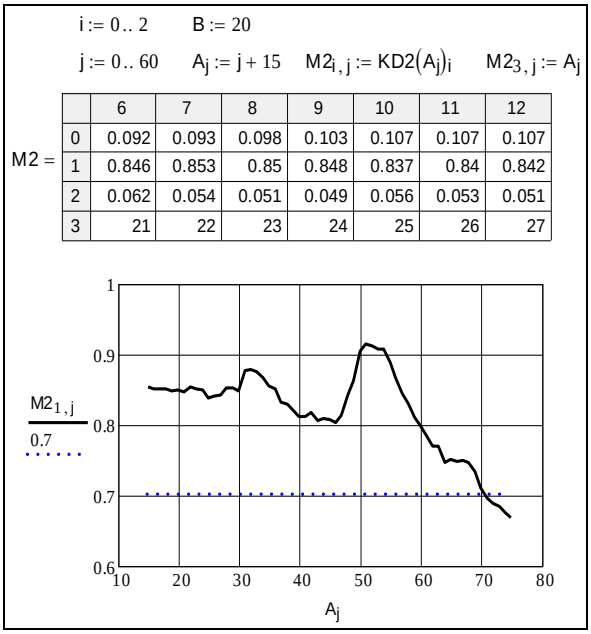
$$C_1 = 0{,}85;\ C_2 = 0{,}15;\ Q = 30\ дм^3/с;\ \alpha_{\min} = -1{,}2\ тыс.н;$$

$$\alpha_{\max} = 1{,}2\ тыс.н.$$

При увеличении расстояния $l$ интервал допустимых значений $\phi$ уменьшается. Так, при $l$ = 20...25 агротехнические требования выполняются в диапазоне значений $\phi$ = 15...70 м. При $l$ = 30...35 м диапазон значений расстояния $\phi$ уменьшился до 35...40 м. При $l$ = 30 м и $l$ = 35 м кривая коэффициента эффективного полива пересекает линию агротехнического допуска три раза.

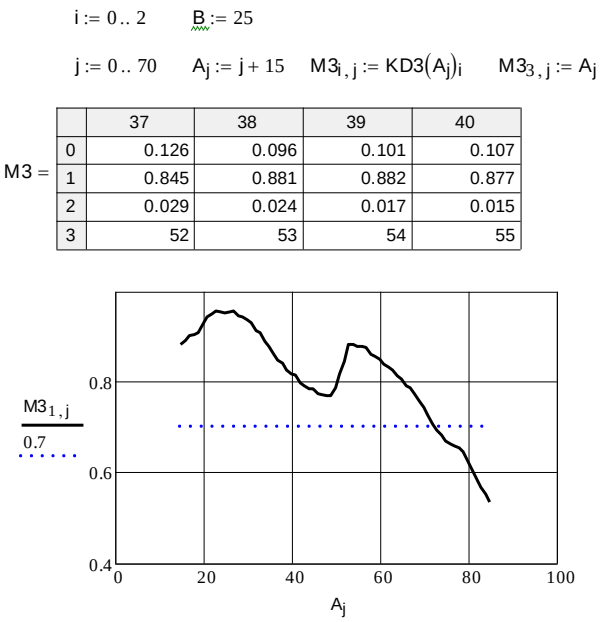
Первое пересечение соответствует выходу показателя в диапазон брака, второе – возврат в поле допуска и третье – снова переход в область брака.

По рисункам 2.28–2.31 можно сделать вывод, что при $l$ = 20 м диапазон эффективных значений параметра $\phi$ более широкий, а при $l$ = 35 м вероятность выхода в область брака повышается.




$M2_{1,j}$ – коэффициент эффективного полива

Рисунок 2.28 – Зависимость коэффициента эффективного полива от расстояния между позициями двухсоплового дальнеструйного аппарата при $l$ = 20 м

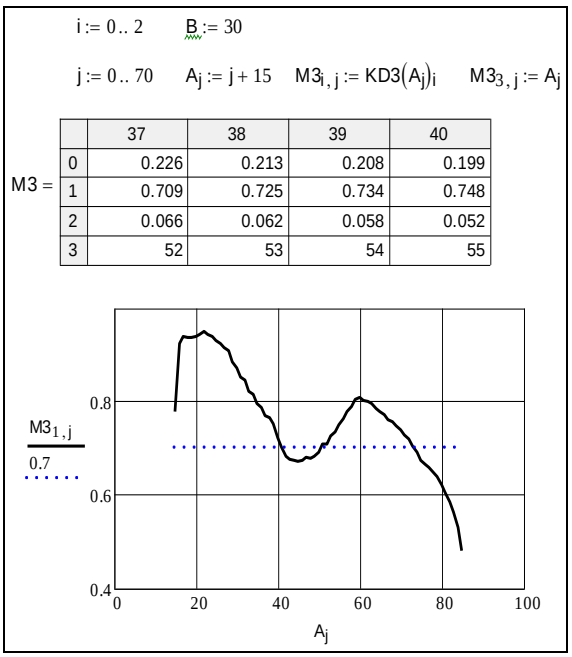



$M3_{1,j}$ – коэффициент эффективного полива

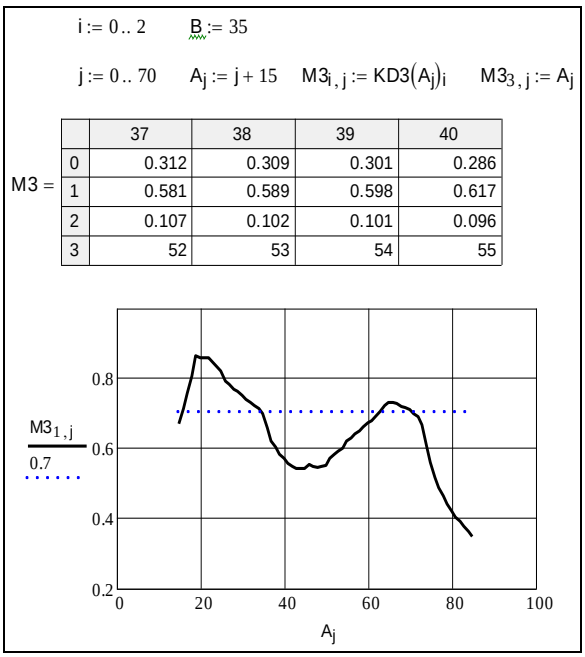
Рисунок 2.29 – Зависимость коэффициента эффективного полива от расстояния между позициями двухсоплового дальнеструйного аппарата при $l$ = 25 м

Программа *CDU(A,B)* [14] (приложение М) вычисляет коэффициент равномерности орошения по Христиансену. Коэффициент Христиансена более жестко оценивает качество орошения [69, 70]. Так, эффективное расстоя-

ние по направлению полета струи при $l$ = 20 м по коэффициенту эффективности равно 70 м (рисунок 2.28), а по коэффициенту Христиансена только 54 м (рисунок 2.32).




| | 37 | 38 | 39 | 40 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.226 | 0.213 | 0.208 | 0.199 |
| 1 | 0.709 | 0.725 | 0.734 | 0.748 |
| 2 | 0.066 | 0.062 | 0.058 | 0.052 |
| 3 | 52 | 53 | 54 | 55 |




| | 37 | 38 | 39 | 40 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.312 | 0.309 | 0.301 | 0.286 |
| 1 | 0.581 | 0.589 | 0.598 | 0.617 |
| 2 | 0.107 | 0.102 | 0.101 | 0.096 |
| 3 | 52 | 53 | 54 | 55 |

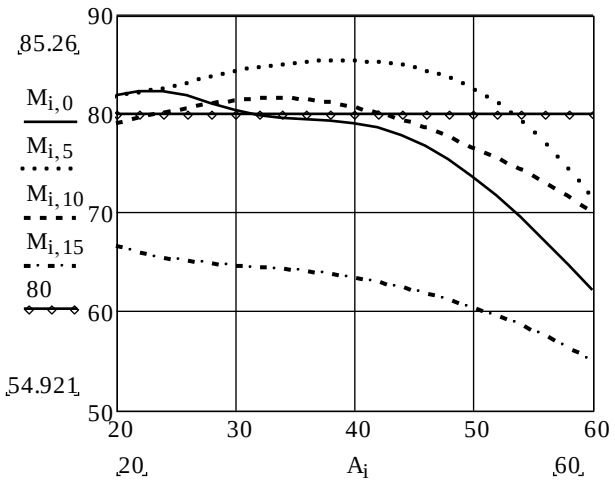
$M3_{1,j}$ – коэффициент эффективного полива

Рисунок 2.30 – Зависимость коэффициента эффективного полива от расстояния между позициями двухсоплового дальнеструйного аппарата при $l$ = 30 м

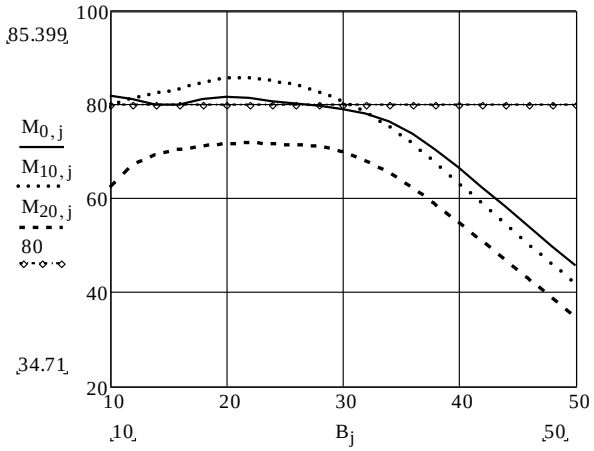
Рисунок 2.31 – Зависимость коэффициента эффективного полива от расстояния между позициями двухсоплового дальнеструйного аппарата при $l$ = 35 м

$i := 0..20 \quad A_i := 2\cdot i + 20 \quad j := 0..20 \quad B_j := 2\cdot j + 10$

$M_{i,j} := CDU(A_i, B_j)$




*О*




*в*

Рисунок 2.32 – Графики коэффициента равномерности Христиансена в функции от $\phi$ и $l$

## 2.4. Выводы

Односопловый аппарат в стационарных системах и на машинах позиционного действия может обеспечить распределение воды по площади полива, соответствующее агротехническим требованиям, только при большом перекрытии зон дождевания соседних аппаратов. Эффективное расстояние между позициями в 1,2 раза больше математического ожидания дальностей полета капель.

Равномерность распределения воды двухсопловым аппаратом достигнута оптимизацией весовых коэффициентов сопел и их числовых характеристик дальностей полета капель. В примере моделирования получен коэффициент вариации доз 16% и коэффициент эффективного полива 0,893, что очень хорошо.

Методика моделирования распределения воды дождевальными аппаратами может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих машин. Рассмотренные примеры можно применить для оптимизации размещения аппаратов на машинах «Волжанка» и «Днепр».

Секторный способ работы аппаратов применяют для работы дальнеструйных аппаратов при ветре и для концевых аппаратов машин кругового действия. По равномерности полива этот способ менее эффективен по сравнению с работой по кругу, но агротехнические требования выполнить можно.

Методика моделирования распределения воды дождевальными аппаратами может использоваться при проектировании новых и модернизации существующих машин. Рассмотренные примеры можно применить для оптимизации размещения стационарных дальнеструйных аппаратов ДД-30; ДД-50; ДД-80 и навесных дождевателей ДДН-70 и ДДН-100.

Оптимизация расстояний [59, 63, 67] между позициями дальнеструйных аппаратов при работе по сектору позволила найти допустимые интервалы расстояний. При $l$ = 20...25 м агротехнические требования выполняются в диапазоне значений $\phi$ = 15...70 м. При $l$ = 30...35 м диапазон значений расстояния $\phi$ уменьшился до 35...40 м. При расстоянии между аппаратами, равном двум математическим ожиданиям дальностей полета капель ($\phi$ = 60; $l$ = 25), коэффициент Христиансена равен 71,4%.

Предварительно можно отметить, что машины непрерывного движения могут обеспечить более равномерное распределение поливной воды по площади за счет уменьшения недополива под аппаратами.

# 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ МАШИНАМИ И АППАРАТАМИ НЕПРЕРЫВНОГО ПОСТУПАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

## 3.1. Моделирование распределения воды машинами с аппаратами кругового действия

Модели зоны дождевания аппаратов на стационаре такие же, как получены во второй главе. Имитация движения машины выполняется интегрированием интенсивностей по линии, параллельной оси Y или вектору скорости машины. В формуле (2.1) необходимо выполнить замену полярных координат на прямоугольные.

Струйный аппарат совершает импульсное вращение вокруг своей оси. приращение угла за один импульс мало по сравнению с угловым размером зоны дождевания при неподвижном аппарате, поэтому происходит многократное наложение зон дождевания и можно считать все угловые координаты аппарата равновероятными [10, 71, 72,73]. Плотность вероятности угла считаем равной $f(\alpha) = 1/2\pi$.

Рассмотрим движение аппарата вместе с машиной относительно неподвижных площадок поля. Доза полива при этом определяется интегрированием интенсивности по времени. Изменение интенсивности во времени определяется траекторией относительного движения зоны полива и площадки. Так как $dt = dS/V_{d\mathfrak{Z}}$, то дозу полива можно определить как криволинейный интеграл первого типа:

$$q_F = \frac{1}{V_{d\mathfrak{Z}}} \int_{\varsigma} I(x, y) dS, \qquad (3.1)$$

где $\varsigma$ – кривая относительной траектории площадки и зоны полива.

Пусть движение машины идет вдоль оси *Y*. Положительный отсчет углов $\alpha$ ведем от оси *Y* против часовой стрелки. Прямоугольные координаты площадки *dF* связаны с полярными соотношениями (2.3).

Интегрирование ведем по линии *L*, параллельной оси *Y* и отстоящей от нее на расстоянии $\mu$. Тогда

$$q_F = \frac{1}{V_{d\mathfrak{Z}}} \int_{L} I(x, y) dy. \qquad (3.2)$$

Программа (рисунок 3.1) считает дозу орошения одним дождевальным аппаратом в заданном диапазоне координаты *X* с шагом 0,5 м, который можно задать другим.

$$
\begin{aligned}
&Q(M\rho,\sigma\rho) := \\
&\quad n \leftarrow 80 \\
&\quad Qa \leftarrow 2 \\
&\quad Vm \leftarrow 1 \\
&\quad \text{for } \ i \in 0..n \\
&\qquad X \leftarrow i\cdot 0.5 - 20.25 \\
&\qquad M_{0,i} \leftarrow X \\
&\qquad tn \leftarrow -20 \\
&\qquad tk \leftarrow 20 \\
&\qquad f \leftarrow \int_{tn}^{0} \frac{Qa}{Vm}\cdot\frac{1}{2\,\pi}\cdot\frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2},M\rho,\sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+t^2}}\,dt \\
&\qquad M_{1,i} \leftarrow f \\
&\quad M
\end{aligned}
$$

Рисунок 3.1 – Программа расчета дозы орошения струйным аппаратом с одним соплом

Графики распределения воды по ширине имеют две вершины (рисунок 3.2). Высота вершин больше при кучном распределении воды по радиусам. Второе сопло у струйных аппаратов применяют для повышения равномерности полива в середине полосы дождевания.

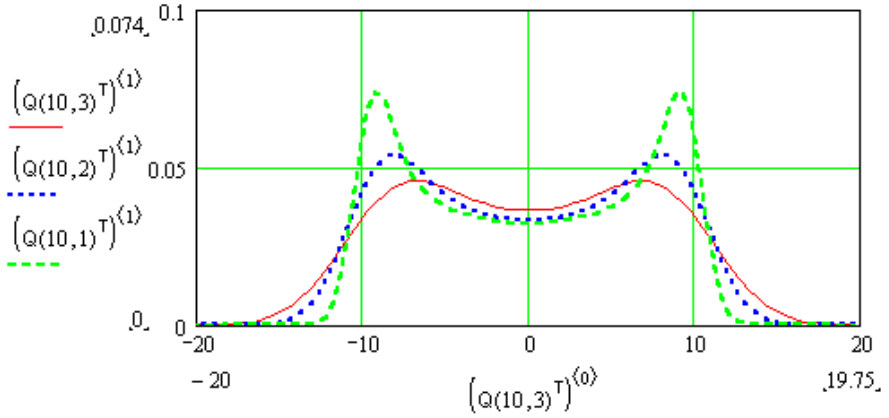



Рисунок 3.2 – Графики распределения воды по ширине полосы дождевания струйным аппаратом с одним соплом

Программа (рисунок 3.3) считает дозу дождевания струйным аппаратом с двумя соплами. Соотношение расходов воды через аппараты задано отношением *K=Qa/Q1*, где *Qa* – расход через основное сопло. Отношение расходов введено в число аргументов функции дозы. Его можно оптимизировать по критерию минимума коэффициента вариации доз. Графики изменения дозы по ширине полосы дождевания выравниваются (рисунок 3.4). Визуально наилучшим является отношение подач *K* = 6.

$$
\begin{aligned}
&Q(M\rho, \sigma\rho, M1\rho, \sigma1\rho, K) := \\
&\quad n \leftarrow 80 \\
&\quad Qa \leftarrow 1 \\
&\quad Q1 \leftarrow \frac{Qa}{K} \\
&\quad Vm \leftarrow 0.01 \\
&\quad \text{for } \ i \in 0..n \\
&\quad\quad X \leftarrow i \cdot 0.5 - 20.25 \\
&\quad\quad M_{0,i} \leftarrow X \\
&\quad\quad tn \leftarrow -20 \\
&\quad\quad tk \leftarrow 20 \\
&\quad\quad f \leftarrow \int_{tn}^{tk} \frac{1}{Vm} \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left( Qa \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2 + t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2 + t^2}} + \frac{Q1 \cdot dnorm\left(\sqrt{X^2 + t^2}, M1\rho, \sigma1\rho\right)}{\sqrt{X^2 + t^2}} \right) dt \\
&\quad\quad M_{1,i} \leftarrow f \\
&\quad M
\end{aligned}
$$

Рисунок 3.3 – Программа расчета дозы орошения как функции параметров зоны дождевания и отношения расходов

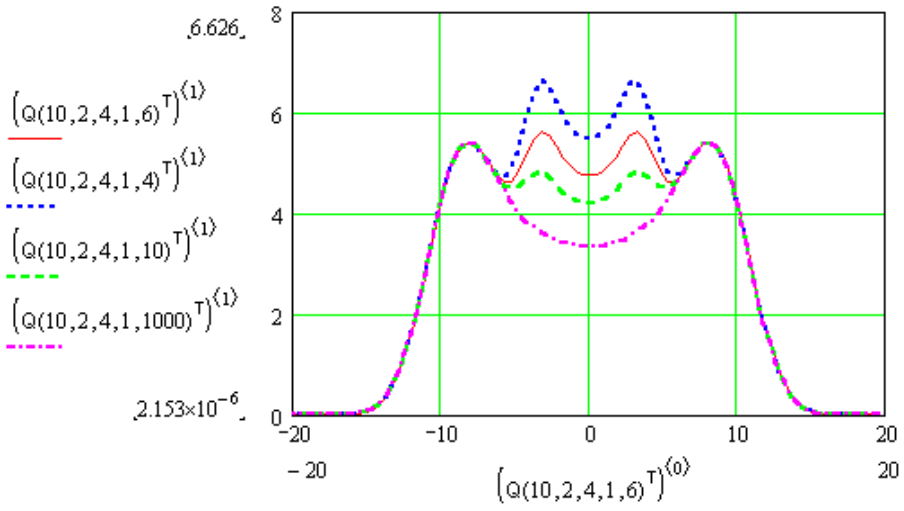



Рисунок 3.4 – Графики изменения дозы по ширине полосы дождевания при различных соотношениях расходов

Равномерность с учетом перекрытия оценивает программа (рисунок 3.5). С помощью функции min находится наименьшее значение коэффициента вариации. Значения ширины, коэффициента вариации и средней дозы выводятся на печать вручную.

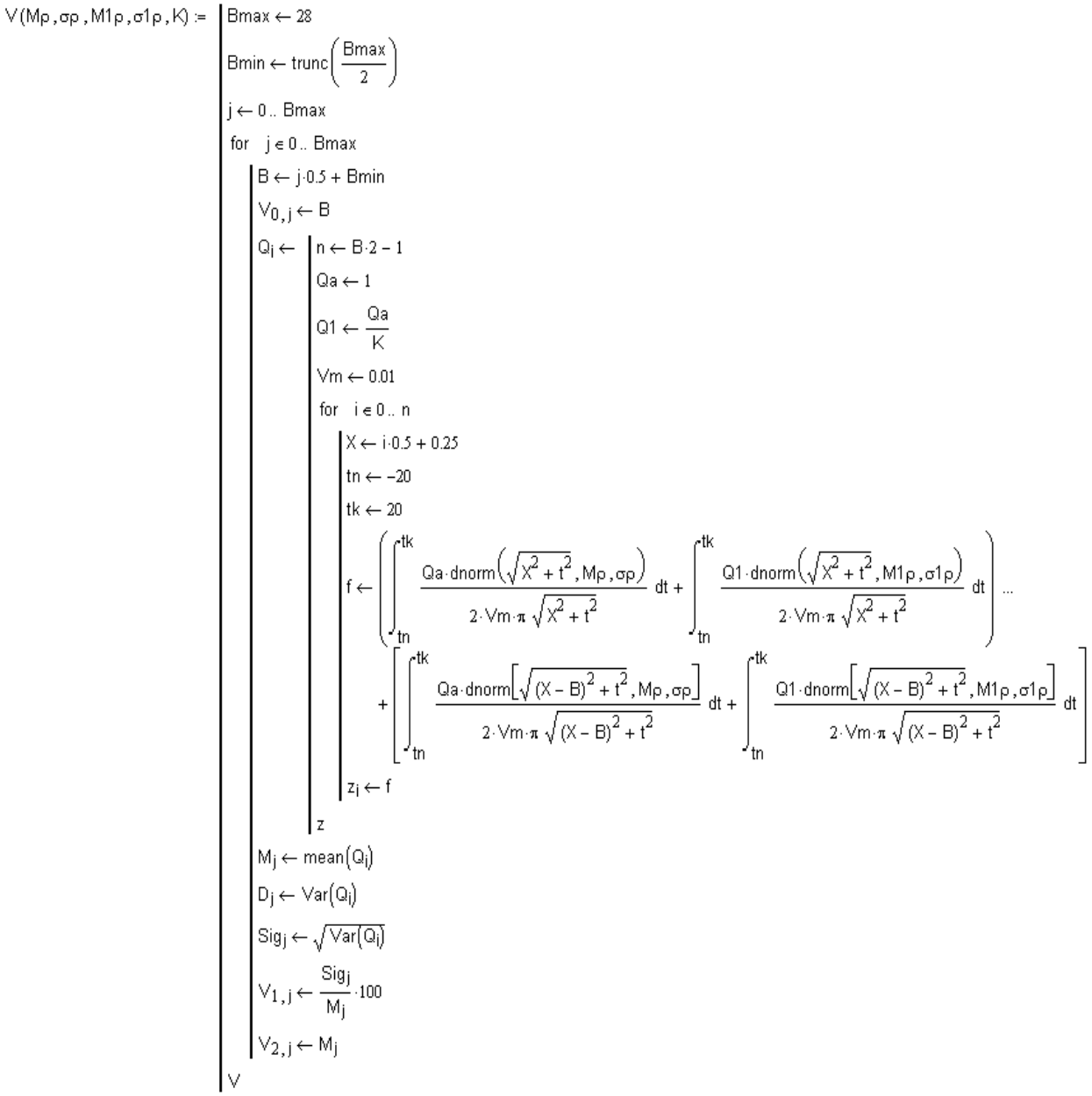



Рисунок 3.5 – Программа оптимизации расстояния
между струйными аппаратами с двумя соплами

Неравномерность $V$ = 6,2% получена при ширине 21,5 м и $K$ = 6. Соотношение $K$ = 6 было наилучшим при $\sigma_\rho$=2. Увеличение этого параметра до трех (рисунок 3.6) привело к уменьшению минимума неравномерности до 3,721% при $K$ = 10. Другие значения $K$ приводят к повышению неравномерности. Диапазон ширины $\varphi l$, при котором $V < 10\%$, у струйного аппарата характеризует устойчивость машины к изменению давления в трубопроводе, то есть к изменению числовых характеристик дальности полета капель дождя.

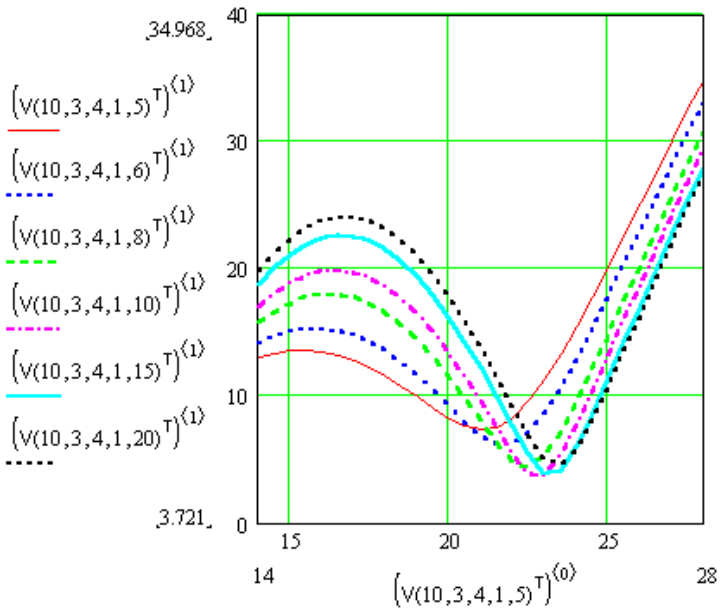



Рисунок 3.6 – Графики неравномерности распределения воды струйным аппаратом с двумя соплами при отношениях между расходами $K$ = 5; 6; 8; 10; 15; 20

Минимальная неравномерность и интервал шага установки аппаратов на трубопроводе с неравномерностью менее 10% могут служить косвенными критериями устойчивости распределения. Можно предположить, что чем выше теоретическая равномерность, тем больше разность между допускаемой и теоретической неравномерностью, тем большими должны быть возмущающие воздействия для вывода процесса в диапазон брака.

### 3.2. Моделирование распределения воды машинами с насадками секторного действия

В настоящее время на машинах фронтального перемещения применяют дефлекторные насадки секторного действия и среднеструйные дождевальные аппараты [72]. Дефлекторные насадки работают при малых давлениях, чем достигается снижение энергоёмкости процесса распределения жидкости по полю, кроме того, они могут давать более равномерное распределение воды. Недостатком секторных насадок является снижение размеров зоны дождевания и, следовательно, повышение интенсивности дождя. Если почва имеет малую впитывающую способность, то приходится увеличивать скорость движения машины или уменьшать подачу воды в машину. Последнее приводит к уменьшению производительности машины, что нежелательно.

Оптимизации процесса работы машин по критериям равномерности распределения жидкостей позволяет снизить материальные и энергетические затраты, повысить вероятность качественной работы при изменении условий эксплуатации, например, рельефа поля или ветра.

Дождевальные насадки создают веер дождя, который орошает сектор на поле [60]. Площадь, орошаемую одним аппаратом, называем зоной дождевания. Предварительно оцениваем равномерность дозы коэффициентом вариации, который связан с коэффициентом эффективного полива функциональной зависимостью, если известен закон распределения отклонений дозы как случайной величины.

Интенсивность дождя на площадке определяется формулой (2.1).

Программы моделирования распределения воды дождевальными насадками составлены в системе MathCAD [74]. Приведем обозначения величин, которые использовались при программировании в MathCad (рисунок 3.7).

| | |
|---|---|
| Qa, Q1 | Расход воды через дождевальняй аппарат или одно сопло, л/с. |
| Vm | Скорость машины, м/с, |
| Mα | Математическое ожидание угла зоны дождевания, рад. |
| σα | Среднее квадратическое отклонение угла зоны дождевания, рад. |
| Mρ | Математическое ожидание дальности полета капель, м, |
| σρ | Среднее квадратическое отклонение дальности полета, м, |
| Q(Mα, σα, Mρ, σρ, X) | Функция дозы полива от ширины X и параметров зоны дождевания, л/м^2 или мм слоя воды. |
| V(Mα, σα, Mρ, σρ) | Коэффициент вариации дозы как функция параметров зоны дождевания. |

Рисунок 3.7 – Обозначения величин в системе MathCAD

Экспериментальные результаты исследования характеристик случайных величин: дальности полета капель и плотности потока по углу дождевания показали допустимость применения допущения о нормальном распределении этих величин при моделировании работы секторных насадок.

Программа (рисунок 3.8) вычисляет дозу как функцию от параметров зоны дождевания с циклом по X.

Результаты работы программы представлены на рисунке 3.9.

$$
\begin{aligned}
&Q(M\alpha, \sigma\alpha, M\rho, \sigma\rho) := \\
&\quad n \leftarrow 80 \\
&\quad Qa \leftarrow 2 \\
&\quad Vm \leftarrow 1 \\
&\quad \text{for } \ i \in 0..n \\
&\qquad X \leftarrow i \cdot 0.5 - 20.25 \\
&\qquad M0_{,i} \leftarrow X \\
&\qquad tn \leftarrow -20 \\
&\qquad tk \leftarrow 20 \\
&\qquad f \leftarrow \int_{tn}^{0} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left(asin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2+t^2}}\right), M\alpha, \sigma\alpha\right) \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+t^2}}\, dt \ \ldots \\
&\qquad\quad + \int_{0}^{tk} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left(\pi \cdot sign(X) - asin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2+t^2}}\right), M\alpha, \sigma\alpha\right) \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+(t^2)}}\, dt \\
&\qquad M1_{,i} \leftarrow f \\
&\quad M
\end{aligned}
$$

Рисунок 3.8 – Программа расчета дозы орошения секторной насадкой

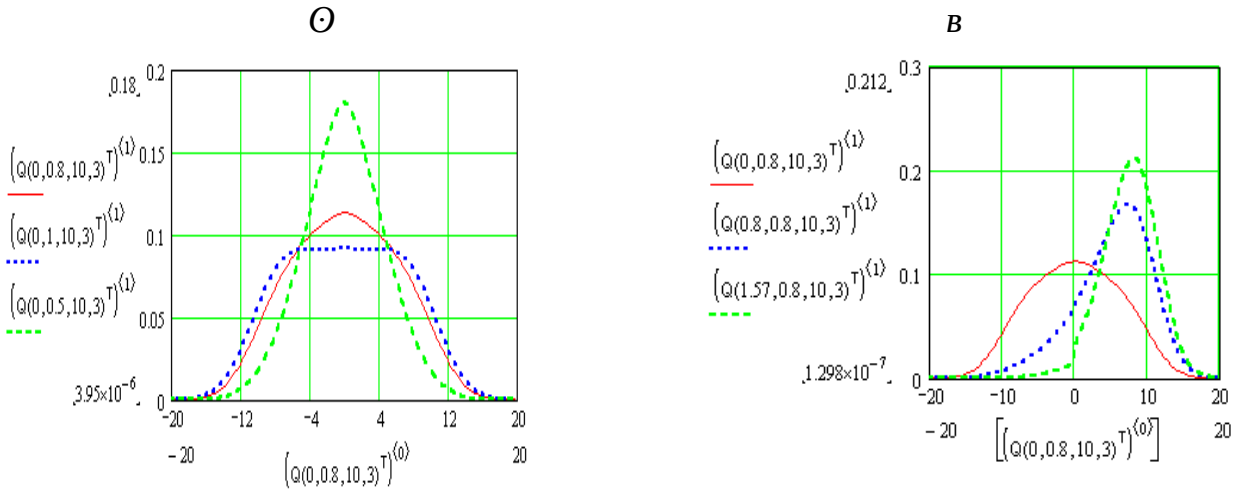



Рисунок 3.9 – Графики распределения воды по ширине полосы дождевания дефлекторной насадкой секторного действия

Выбором оптимального перекрытия зон дождевания соседних насадок можно получить очень равномерное распределение воды. Программа (рисунок 3.10) моделирует перекрытие зон дождевания и выдает результат счета в виде матрицы (рисунок 3.11) или графика (рисунок 3.12).

$$
\begin{aligned}
&Q(M\alpha, \sigma\alpha, M\rho, \sigma\rho, B) := \\
&\quad n \leftarrow 159 \\
&\quad Qa \leftarrow 1 \\
&\quad Vm \leftarrow 0.01 \\
&\quad \text{for } \ i \in 0..n \\
&\qquad X \leftarrow i \cdot 0.5 - 20.25 \\
&\qquad M_{0,i} \leftarrow X \\
&\qquad tn \leftarrow -20 \\
&\qquad tk \leftarrow 20 \\
&\qquad f \leftarrow \int_{tn}^{0} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left(asin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2+t^2}}\right), M\alpha, \sigma\alpha\right) \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+t^2}}\, dt \ldots \\
&\qquad\quad + \int_{0}^{tk} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left(\pi \cdot sign(X) - asin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2+t^2}}\right), M\alpha, \sigma\alpha\right) \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+t^2}}\, dt \ldots \\
&\qquad\quad + \left[ \int_{tn}^{0} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left[asin\left[\frac{X-B}{\sqrt{(X-B)^2+t^2}}\right], M\alpha, \sigma\alpha\right] \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X-B)^2+t^2}}\, dt \ldots \right. \\
&\qquad\qquad \left. + \int_{0}^{tk} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left[\pi \cdot sign(X-B) - asin\left[\frac{X-B}{\sqrt{(X-B)^2+t^2}}\right], M\alpha, \sigma\alpha\right] \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X-B)^2+t^2}}\, dt \right] \\
&\qquad M_{1,i} \leftarrow f \\
&\quad M
\end{aligned}
$$

Рисунок 3.10 – Программа моделирования перекрытия зон дождевания

$Q(0, 0.8, 10, 3, 20) =$

| | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | -2.25 | -1.75 | -1.25 | -0.75 | -0.25 | 0.25 | 0.75 |
| 1 | 5.387 | 5.472 | 5.546 | 5.611 | 5.674 | 5.676 | 5.615 |

Рисунок 3.11 – Матрица результатов счета дозы

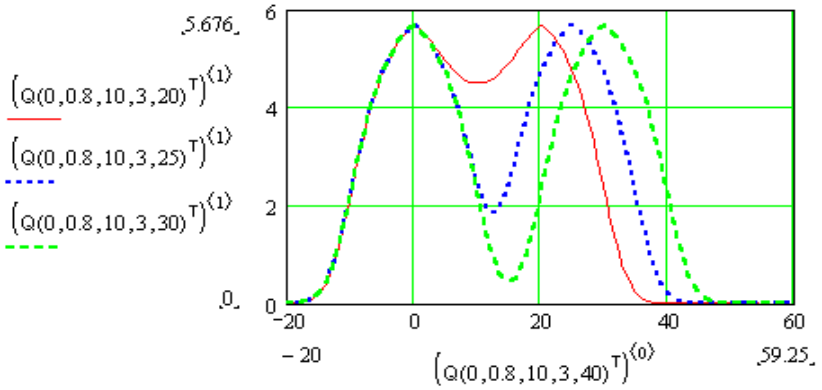



Рисунок 3.12 – График изменения дозы в зоне перекрытия при $B$ = 20, 25 и 30 м

Пределы изменения аргумента $X$ задают в программе числом точек вычисления, шагом его изменения $\Delta X$ и начальным значением. На рисунке 3.12 число точек $n$=159, шаг равен 0,5 м, начало счета при $X$ = -20.25. Программа

не считает дозу при $X$=0, поэтому и $\Delta X$ , и $X_{dQ_i}$ заданы так, чтобы для любой из точек $X$ не равнялось нулю. Большие матрицы MathCAD выводит в виде таблиц с полосой прокрутки, дающей возможность просмотра всей матрицы от $i$=0 до $i$=159. В нулевой строке таблицы выведено расстояние $X$ между насадками, в первой – доза.

Анализ изменения дозы в зоне перекрытия (рисунок 3.12) позволяет отметить, что при $B$ = 20 м оптимальное перекрытие не достигнуто. Если уменьшить расстояние между насадками, то распределение станет равномернее.

Оптимальную расстановку насадок рассчитывает следующая программа (рисунок 3.13) [62].

$$
\begin{aligned}
&V(M\alpha, \sigma\alpha, M\rho, \sigma\rho) := \\
&\quad Bmax \leftarrow 35 \\
&\quad Bmin \leftarrow \operatorname{trunc}\left(\frac{Bmax}{2}\right) \\
&\quad j \leftarrow 0 .. Bmax \\
&\quad \text{for } \ j \in 0 .. Bmax \\
&\qquad B \leftarrow j \cdot 0.5 + Bmin \\
&\qquad V_{0,j} \leftarrow B \\
&\qquad Q_j \leftarrow \left| \begin{array}{l}
n \leftarrow B \cdot 2 - 1 \\
Qa \leftarrow 1 \\
Vm \leftarrow 0.01 \\
\text{for } \ i \in 0 .. n \\
\quad X \leftarrow i \cdot 0.5 + 0.25 \\
\quad tn \leftarrow -20 \\
\quad tk \leftarrow 20 \\
\quad f \leftarrow \displaystyle\int_{tn}^{0} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left(asin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2+t^2}}\right), M\alpha, \sigma\alpha\right) \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+t^2}}\, dt \ldots \\
\qquad + \displaystyle\int_{0}^{tk} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left(\pi \cdot sign(X) - asin\left(\frac{X}{\sqrt{X^2+t^2}}\right), M\alpha, \sigma\alpha\right) \cdot \frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+t^2}}\, dt \ldots \\
\qquad + \left[ \displaystyle\int_{tn}^{0} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left[asin\left[\frac{B-X}{\sqrt{(B-X)^2+t^2}}\right], M\alpha, \sigma\alpha\right] \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B-X)^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B-X)^2+t^2}}\, dt \ldots \right. \\
\qquad \left. + \displaystyle\int_{0}^{tk} \frac{Qa}{Vm} \cdot dnorm\left[\pi \cdot sign(B-X) - asin\left[\frac{B-X}{\sqrt{(B-X)^2+t^2}}\right], M\alpha, \sigma\alpha\right] \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B-X)^2+t^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B-X)^2+t^2}}\, dt \right] \\
\quad z_i \leftarrow f \\
z
\end{array} \right. \\
&\qquad M_j \leftarrow mean(Q_j) \\
&\qquad D_j \leftarrow Var(Q_j) \\
&\qquad Sig_j \leftarrow \sqrt{Var(Q_j)} \\
&\qquad V_{1,j} \leftarrow \frac{Sig_j}{M_j} \cdot 100 \\
&\qquad V_{2,j} \leftarrow M_j \\
&V
\end{aligned}
$$

Рисунок 3.13 – Программа оптимизации расстояния между насадками

Программа изменяет расстояние между насадками в пределах от $B_{max}/2$ до $B_{max} = 2\cdot(\int_{\rho} + 3\cdot\sigma_{\rho})$. Пределы можно задать формулами или цифрами.

Результат выводится в виде таблицы EXCEL (рисунок 3.14). В первой строке – расстояние между насадками по ширине полосы дождевания, во второй – коэффициент вариации дозы на ширине $B$, в третьей – среднее значение дозы на этой ширине.

$V(0, 0.8, 10, 3) =$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 17 | 17.5 | 18 | 18.5 | 19 | 19.5 | 20 | 20.5 | 21 | 21.5 |
| 1 | 3.99 | 2.739 | 1.866 | 2.368 | 3.945 | 5.907 | 8.059 | 10.338 | 12.708 | 15.148 |
| 2 | 5.873 | 5.707 | 5.55 | 5.401 | 5.259 | 5.124 | 4.996 | 4.874 | 4.758 | 4.648 |

$M := \min\left[\left(V(0, 0.8, 10, 3)^{T}\right)^{\langle 1\rangle}\right]$ $M =$ $V(0, 0.8, 10, 3)^{\langle 2\rangle} =$

Рисунок 3. 14 – Результаты счета по программе оптимизации расстояний

Стандартная функция min находит минимальную неравномерность. Для выделения строки $V_1$ из общей матрицы её транспонируют и задают номер столбца. По этому принципу выделяют строки матрицы при построении графиков.

Вывод столбца с минимальной неравномерностью выполнен вручную. Коэффициент вариации дозы при оптимальном расстоянии между насадками получен равным 1,87%, что можно считать отличным результатом моделирования. Ранее показано, что струйными аппаратами такой результат получить невозможно или затруднительно.

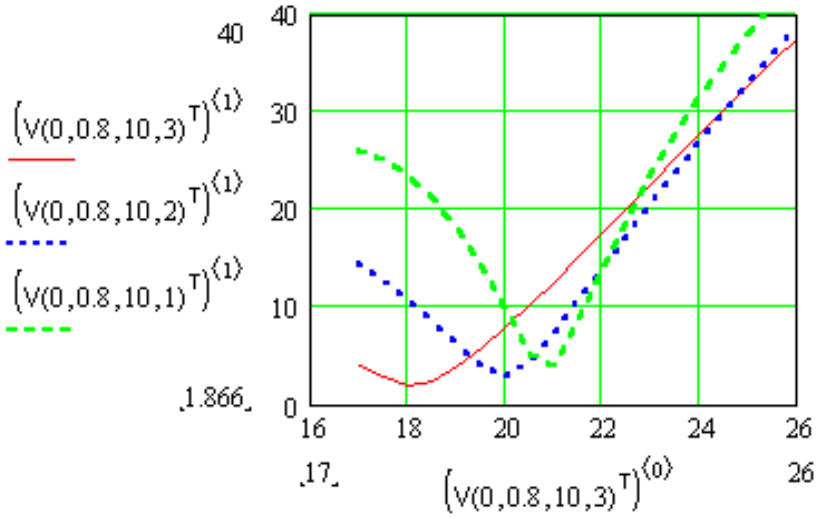



Рисунок 3.15 – График зависимости коэффициента вариации дозы от расстояния между насадками

Графики зависимости коэффициента вариации от расстояния между форсунками (рисунок 3.15) построены при различной кучности распада струи (последний параметр функции).

Кривые неравномерности при разной кучности распределения воды по радиусам отличаются численным значением минимума и величиной интервала, в котором $V$ меньше заданного допуска, например, 10%. При $\sigma_\rho$ = 3 м достигнута самая высокая равномерность и наибольшая величина интервала $\Delta B$, в котором $V$< 10%. При большой кучности ($\sigma_\rho$=1 м) $V_{\min}$ = 3,9%, а $\Delta l$ = 1,5 м. Влияние величины $\sigma_\rho$ на показатели распределения воды секторной насадкой существенно меньше, чем струйным аппаратом.

# 4. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ МАШИНАМИ КРУГОВОГО ДВИЖЕНИЯ

Машины вращательного движения получили значительное распространение. Назрела необходимость разработки математических моделей функционирования таких машин.

Рассмотрим часть трубопровода машины с четырьмя аппаратами. Нумерацию аппаратов выполним в соответствии с рисунком 4.1.

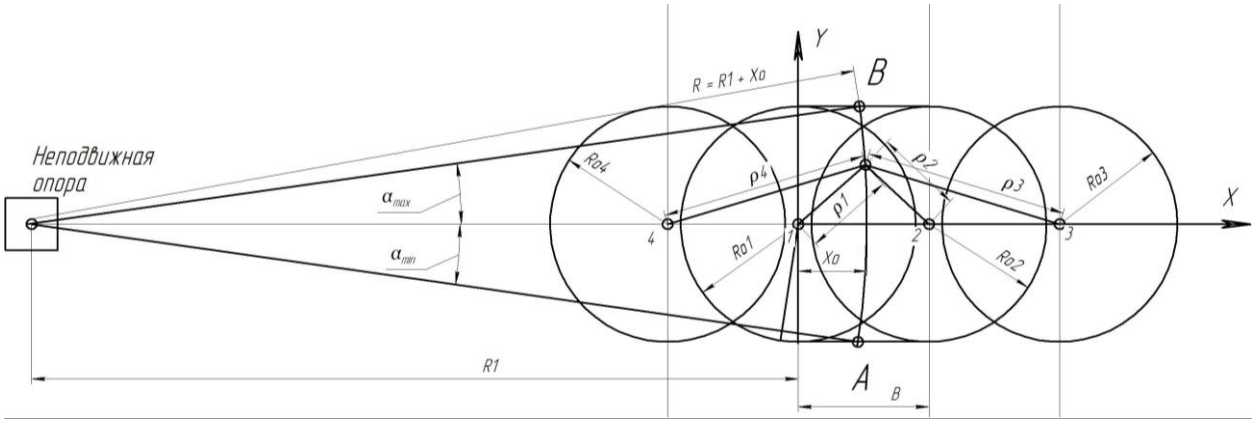



Рисунок 4.1 – Схема обозначений для построения модели

Примем следующие обозначения:

$R1, R2, R3, R4$ – расстояния от аппаратов до неподвижной опоры;

$Ro1, Ro2, Ro3, Ro4$ – радиусы орошения аппаратов;

$\rho 1, \rho 2, \rho 3, \rho 4$ – расстояния от аппаратов до точки, в которой определяется интенсивность дождевания;

$B$ – шаг расстановки аппаратов.

В соответствии с принятыми обозначениями по рисунку 4.1 имеем: $R2 = R1 + B;\ \ R3 = R1 + 2 \cdot B;\ \ R4 = R1 - B.$

Начало системы координат $XO_1Y$ выбираем в центре зоны орошения первого аппарата.

Вначале рассмотрим интенсивность дождя в зоне орошения при неподвижном трубопроводе. Границы учетной площадки ограничиваем вертикальными линиями, проходящими через точки размещения первого и второго аппаратов и горизонтальными – через точки $Y = -Ro1$ и $Y = +Ro1$. На первом этапе моделирования радиусы орошения аппаратов принимаем одинаковыми. В формуле интенсивностей знаменатель не должен быть равным нулю, поэтому учетную площадку делим на квадраты размером 0,5×0,5 м так, чтобы середины квадратов не совпали с началом координат и с точкой размещения второго аппарата (рисунок 4.2).

Контурный график интенсивности орошения на рисунке 4.3 показывает избыточность перекрытия зон дождевания аппаратов.

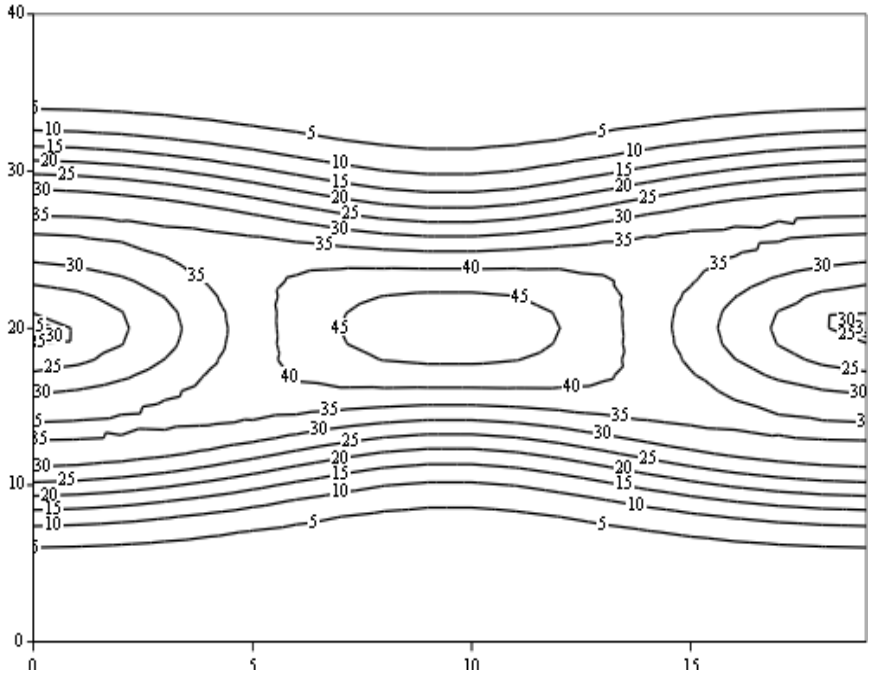
Увеличение расстояния $l$ между аппаратами до 12 м (рисунок 4.4) привело к повышению равномерности в зоне дождевания, однако это при отсутствии вращения трубопровода.

$$M\rho := 4.2 \quad \sigma\rho := 1.7 \quad Q := 1 \quad T := 3600 \quad B := 10$$

$$ZD(X,Y) := Q\cdot T\cdot\frac{1}{2\cdot\pi}\cdot\frac{dnorm\left(\sqrt{X^2+Y^2},M\rho,\sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}} \ldots$$
$$+ Q\cdot T\cdot\frac{1}{2\cdot\pi}\cdot\frac{dnorm\left[\sqrt{(B-X)^2+Y^2},M\rho,\sigma\rho\right]}{\sqrt{(B-X)^2+Y^2}} \ldots$$
$$+ Q\cdot T\cdot\frac{1}{2\cdot\pi}\cdot\frac{dnorm\left[\sqrt{(B+X)^2+Y^2},M\rho,\sigma\rho\right]}{\sqrt{(B+X)^2+Y^2}} \ldots$$
$$+ Q\cdot T\cdot\frac{1}{2\cdot\pi}\cdot\frac{dnorm\left[\sqrt{(2\cdot B-X)^2+Y^2},M\rho,\sigma\rho\right]}{\sqrt{(2\cdot B-X)^2+Y^2}}$$

$$i := 0\,..\,(2\cdot B-1) \quad X_i := i\cdot 0.5 + 0.25 \quad Ro := 10$$
$$j := 0\,..\,40 \quad Y_j := j\cdot 0.5 - Ro \quad MD_{i,j} := ZD(X_i, Y_j)$$

Рисунок 4.2 – Программа расчета интенсивности полива при неподвижном трубопроводе, расстояние между аппаратами $l$ = 10 м




MD

Рисунок 4.3 – Контурные графики интенсивности полива при расстоянии между аппаратами $l$ = 10 м

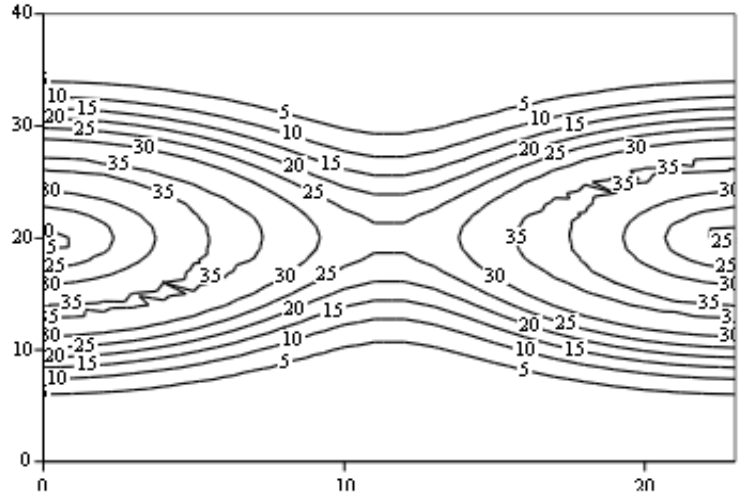



Рисунок 4.4 – Контурные графики интенсивности полива
при расстоянии между аппаратами $l$ = 12 м

Увеличение $l$ до 15 метров (рисунок 4.5) привело к наличию разрыва между зонами дождевания. Такой вариант для работы машины явно не годится.

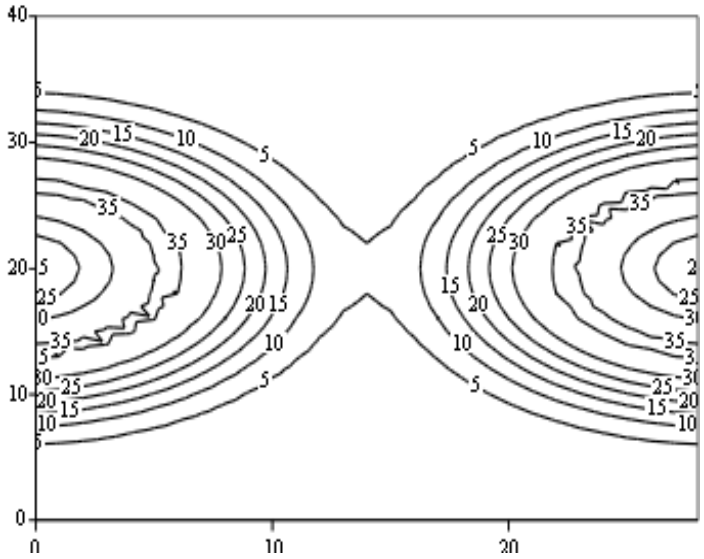



Рисунок 4.5 – Контурный график интенсивности полива
при неподвижном трубопроводе, расстояние $l$ = 15 м

Определим интенсивность орошения в дождемерах между первым и вторым аппаратами на дугах окружностей по траекториям движения облака дождя при вращении трубопровода. Расстояние между первым и вторым аппаратами делим на отрезки. Через точки деления проводим дуги окружностей

из точки расположения неподвижной опоры. На рисунке 4.1 изображена одна из них (дуга *AB).*

Для расчета интенсивностей орошения на линии *AB* дуга делится на равные части. Количество точек деления, например пятьдесят, зависит от способа численного интегрирования и необходимой точности. В системе MathCad нет стандартной программы криволинейного интеграла, поэтому необходимо вычислить координаты *X,Y* точек деления дуги $\phi l$, определить интенсивности дождевания в каждой точке.

Имитация вращательного движения машины относительно неподвижной опоры осуществляется интегрированием интенсивности по дуге окружности $\phi l$, то есть как криволинейный интеграл. Кривизна дуги зависит от расстояния площадки *R* от центральной опоры. На последних пролетах кривизна стремится к нулю, и интегрировать можно по линии параллельной оси Y. На первых пролетах ошибка от такого допущения будет более значимой.

Для определения дозы полива при движении машины необходимо вычислить сумму интенсивностей по всей дуге, умножить её на время прохода машиной одного участка дуги и оценить полученный результат. Время прохода каждого участка дуги определяется делением приращения угла на угловую скорость трубопровода, то есть по формуле

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \alpha m \cdot T \cdot 3600}{n \cdot 2 \cdot \pi},$$

где $\alpha m = a\sin(Ro1/(R2 + Xo))$;

$n$ – число точек деления дуги окружности;

$T$ – время полного оборота трубопровода в часах.

Результат такого счета является значением криволинейного интеграла, вычисленным по способу прямоугольников. Для оценки точности результата вычисления проводят при разном числе точек деления дуги и сравнивают результаты. При плохой точности увеличивают число точек деления дуги.

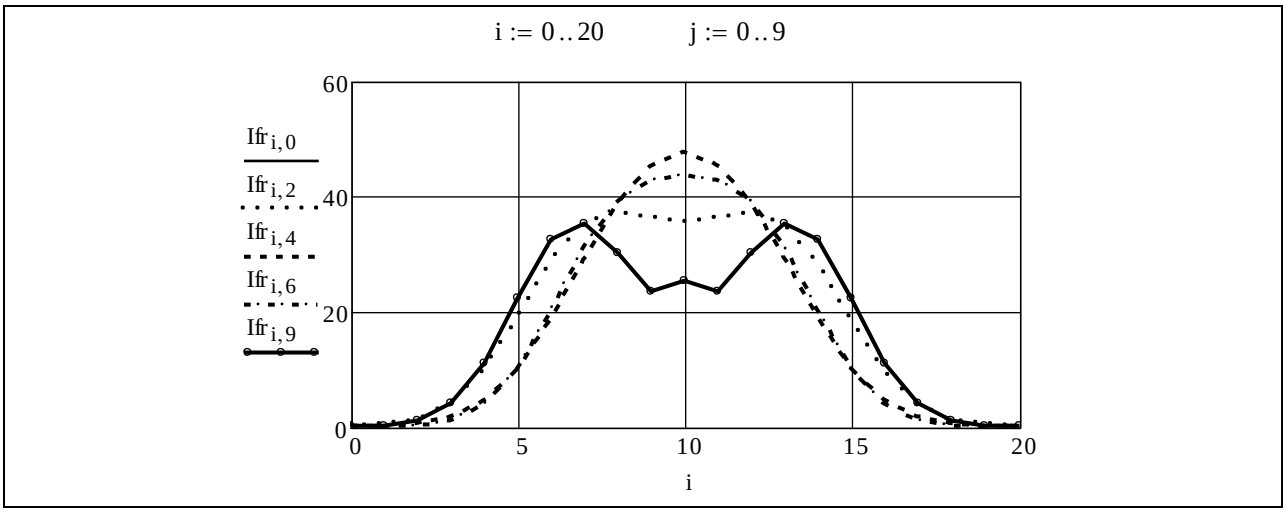



Рисунок 4.6 – Вывод результатов счета программой расчета интенсивностей орошения в дождемерах, установленных на дугах окружностей (см. рис. 4.1)

Программа расчета интенсивностей на дугах окружностей между первым и вторым аппаратами по рисунку 4.1 (приложение Н) выводит результат счета в виде матрицы или рисунка. На рисунке 4.6 показаны графики изменения интенсивностей на различных окружностях.

На окружностях вблизи от точек установки первого и второго аппаратов распределение двухвершинное. В промежутке между аппаратами – распределение одновершинное.

Программа Ifr вычисляет интенсивности орошения на дугах окружностей в миллиметрах слоя осадков в час. Один килограмм воды на квадратный метр дает слой осадков в один миллиметр.

Программа CDUfr(B) (приложение О) предназначена для вычисления равномерности по Христиансену. Цикл изменения расстояния B задается вне программы. По результатам счета построен график (рисунок 4.7).

$j := 0..10 \qquad B_j := j + 8 \qquad VCD_j := CDUfr(B_j)$

$VCD =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 87.202 |
| 1 | 92.314 |
| 2 | 97.078 |
| 3 | 89.216 |
| 4 | 79.705 |
| 5 | 70.118 |
| 6 | 61.431 |
| 7 | 53.705 |
| 8 | 46.253 |
| 9 | 39.677 |
| 10 | 33.393 |

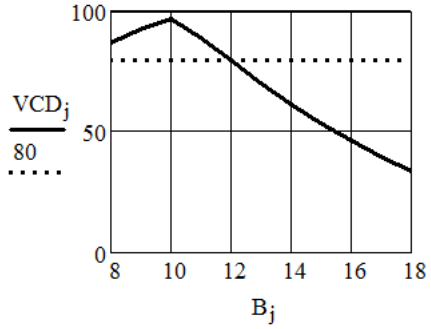



Рисунок 4.7 – Вывод результатов счета равномерности по Христиансену при $B = 8...18$ м

Равномерность более восьмидесяти процентов получена при шаге установки аппаратов менее 12 м.

Если в программе CDUfr(B) последнюю команду заменить на VD, то результат выводится в виде вектора доз VD (рисунок 4.8).

$j := 0..9$ $VD10 := CDUfr(10)$ $Xo_j := j + 0.5$

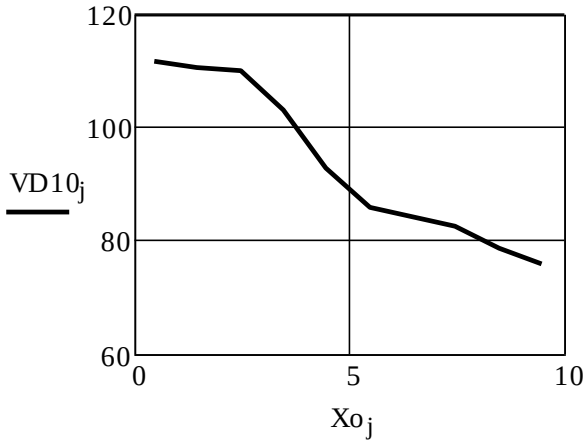



Рисунок 4.8 – Графики зависимости дозы орошения от координаты *Xo* после прохода машиной дождемеров, установленных вдоль оси *X* при $l$ = 10 м (см. рис. 4.1)

$j := 0..14$ $VD15 := CDUfr(15)$ $Xo_j := j + 0.5$

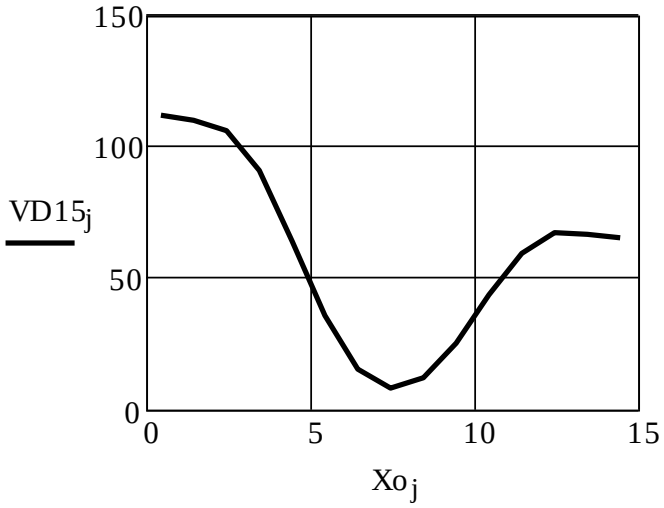
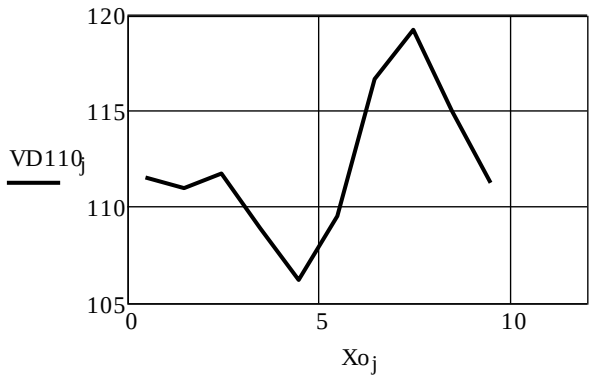



Рисунок 4.9 – Графики зависимости дозы орошения от координаты *Xo* после прохода машиной дождемеров, установленных вдоль оси *X* при $l$ = 15 м (см. рис. 4.1)

По рисунку 4.8 отметим, что вблизи от первого аппарата доза больше, чем вблизи от второго. Отношение доз при шаге установки аппаратов 10 м равно 1,47, а при шаге 15 м – 1,67, если расходы аппаратов равны.

Если расход у второго аппарата увеличить в 1,47 раза, то график VD10 выравнивается (рисунок 4.10). Уменьшение дозы орошения при удалении от неподвижной опоры происходит потому, что интервалы угла $\Delta\alpha$ уменьшаются, следовательно, время их прохождения тоже уменьшается.

$j := 0..9$ $VD110 := CDUfr1(10)$ $Xo_j := j + 0.5$




VD110 =

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 111.497 |
| 1 | 110.919 |
| 2 | 111.699 |
| 3 | 108.866 |
| 4 | 106.125 |
| 5 | 109.51 |
| 6 | 116.639 |
| 7 | 119.191 |
| 8 | 114.996 |
| 9 | 111.22 |

Рисунок 4.10 – График дозы орошения при $Q2 = 1{,}47 \cdot Q1$

В начальной и в конечной точках графика дозы орошения практически одинаковы. В зоне перекрытия зон орошения от первого и второго аппаратов наблюдаются некоторые колебания дозы. По рисунку 4.10 колебания воспринимаются как большие из-за крупного масштаба графика. Все значения дозы находятся в интервале 106...119. Равномерность по Христиансену в этом случае равна 97,4%.

Модель процесса распределения воды машиной кругового движения позволяет оптимизировать расстановку аппаратов на трубопроводе и расходы через аппараты.

Графики распределения осадков на каждом пролете машины можно получить путем ввода исходных данных для каждого пролета: $Ro1$, $R1$, $Q1$, $Q2$, $Q3$, $Q4$, $M\rho$, $\sigma\rho$. Если аппараты имеют разные радиусы орошения, то следует дополнительно вводить $M\rho$ и $\sigma\rho$ для каждого аппарата.

Третий и четвертый аппараты оказывают влияние на распределение осадков между первым и вторым аппаратами при шаге установки меньшем радиуса орошения первого аппарата.

Дальнейшие исследования следует проводить для оптимизации шага установки и расхода через аппараты на всей длине трубопровода. Такой расчет можно сделать, если иметь расходные характеристики аппаратов, результаты их испытания радиальным методом, характеристику напорной линии трубопровода.

Для примера увеличим расстояние до первого аппарата до 200 метров, определим дозу орошения у первого и у второго аппаратов при $Q1 = 1$ и $Q2 = 1{,}47$. Результат показан на рисунке 4.11.

$j := 0..9$ $Xo_j := j + 0.5$

$CDUfr2(10) =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 11.23 |
| 1 | 11.436 |
| 2 | 11.826 |
| 3 | 11.946 |
| 4 | 12.242 |
| 5 | 13.333 |
| 6 | 14.796 |
| 7 | 15.525 |
| 8 | 15.261 |
| 9 | 14.992 |

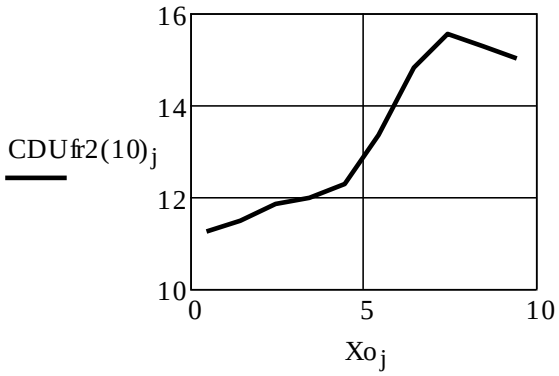



Рисунок 4.11 – Результаты счета дозы при $R1 = 200$ м

Значение дозы в нулевой точке оказалось в 7,8 раза меньше, чем в аналогичной точке пролета при $R1 = 20$. В конечной точке графика доза в 1,34 раза больше, чем в начальной. Это значит, что на этом пролете расходы через аппараты могут отличаться только в 1,1 раза. Увеличим расход первого аппарата в 7,8 раза, а второго – до 8,1. Результаты счета приведены на рисунке 4.12. Все значения дозы находятся в интервале 84,8...90,87. Равномерность орошения по Христиансену получена 98,1%.

Так можно пересчитать все пролеты.

$j := 0..9$ $Xo_j := j + 0.5$

$CDUfr2(10) =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 87.539 |
| 1 | 88.88 |
| 2 | 90.839 |
| 3 | 88.679 |
| 4 | 84.816 |
| 5 | 84.93 |
| 6 | 88.873 |
| 7 | 90.838 |
| 8 | 88.525 |
| 9 | 86.784 |

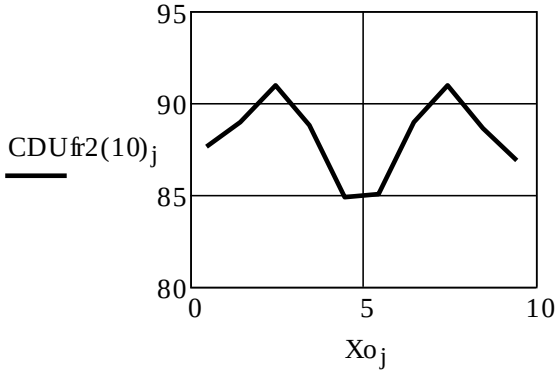



Рисунок 4.12 – Результат счета при $Q1 = 7{,}8$ и $Q2 = 8{,}1$, $R1 = 200$ м

# 5. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИСПЫТАНИЙ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН И АППАРАТОВ

## 5.1. Стандартные методы испытаний аппаратов

Вначале рассмотрим рекомендации стандартов по определению эксплуатационных характеристик дождевальных машин и аппаратов [5, 7].

Испытания по определению эксплутационных характеристик следует проводить для каждой насадки дождевального аппарата либо для комбинации насадок. Во время испытаний давление не должно изменяться больше чем на ±4%.

*Испытания проводят* для дождевальных аппаратов, имеющих частоту вращения менее чем один оборот за 20 с.

Для дождевальных аппаратов, установленных на вертикальном стояке, испытания проводят при испытательном давлении и измеряют время поворота на каждую четверть оборота. Испытания продолжают до пяти оборотов. Вычисляют среднее значение времени, необходимого для поворота на четверть оборота, и наибольшие отклонения от среднего значения, выраженные в процентах.

Отклонение от среднего значения не должно превышать ±12%.

*Испытания по определению равномерности расхода воды проводят* на одной выборке при испытательном давлении с установкой на стояках или на устройствах, рекомендованных изготовителем. Устанавливают каждый дождевальный аппарат на испытательную установку и измеряют расход воды при испытательном давлении.

Выборка должна иметь следующие верхний и нижний уровни предельного качества:

- 7% – для дождевальных аппаратов с номинальным расходом воды до 250 л/ч;

- 5% – для дождевальных аппаратов с номинальным расходом воды более 250 л/ч.

*Испытания проводят* в соответствии с ИСО 7749-2.

Дождевальный аппарат должен отработать 1 ч при выдерживании испытательного давления на входе в дождевальный аппарат.

Измеряют количество воды в каждом из дождемеров.

Интенсивность орошения $h$, мм/ч, рассчитывают по формуле

$$h = \frac{V \cdot 10}{A} \cdot \frac{1}{t}, \qquad (5.1)$$

где $V$ – объем воды в каждом дождемере, мм$^3$;

$A$ – площадь каждого приемного отверстия дождемера, см$^2$;

$t$ – продолжительность испытаний, ч.

В формуле (5.1) размерность не сходится. Вместо множителя 10 в числителе необходимо поставить 100.

Строят кривые распределения воды всех дождемеров, которые выражают зависимость интенсивности орошения от расстояния каждого дождемера до дождевального аппарата вдоль радиуса орошения.

Испытания проводят по одному радиусу при отсутствии ветра (см. ИСО 7749-2 [5, 7]). Строят кривые распределения воды для трех дождевальных аппаратов и рассчитывают среднее значение кривой распределения воды.

Дождевальный аппарат должен соответствовать следующим требованиям:

а) на кривых распределения воды испытуемых дождевальных аппаратов не должно быть точек с отклонением более чем на ±0,25 мм/ч, или ±10% от соответствующей точки кривой среднего значения распределения;

б) на кривой среднего значения распределения воды не должно быть точек с отклонением более чем на ±0,25 мм/ч, или ±10% от соответствующей точки кривой распределения, представленной изготовителем.

Дождевальные аппараты с расходом воды более 250 л/ч. Испытания равномерности орошения проводят полнополевым методом или радиальным методом (см. ИСО 7749-2). Условия испытаний и расчет равномерности орошения установлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Равномерность орошения

| Скорость ветра, м/с | Давление | Шаг дождевальных аппаратов |
|---|---|---|
| Не более 0,9* | Три различных давления, кратных 50 кПа, взятых в начале, середине и в конце диапазона эффективного давления, установленного изготовителем | Три последовательных шага дождевальных аппаратов, согласованные с изготовителем |
| * Дождевальные аппараты с нормальным углом траектории допускается испытывать полнополевым методом при скорости ветра не более 2 м/с (при этом изготовитель должен указать в каталоге скорость ветра, при которой можно проводить испытания). | | |

Рассчитывают коэффициент равномерности орошения (CDU) дождевальным аппаратом методом Христиансена (см. ИСО 7749-2:1990, приложение А).

*R fmgf[r lsO[dk[w tf[ts tstf[tqj hnj dgj dk[[k ,WWj$lscf[odtscf[ts hcf[O[dgj ls tqO[tstqts[h j dk[[w*

Испытания по определению эффективного диаметра орошения проводят при испытательном давлении, установленном изготовителем. Испытания могут быть проведены полнополевым или радиальным методами.

При испытаниях полнополевым методом эффективный диаметр орошения вычисляют как среднее значение измерений в четырех направлениях под углом 90° друг к другу, в которых установлены дождемеры (два ряда в каждом направлении).

При испытании радиальным методом эффективный диаметр орошения вычисляют как среднее значение четырех измерений, сделанных при повороте дождевального аппарата на четверть оборота (90°) относительно своей оси для каждого измерения или путем размещения дождемеров вдоль четырех радиусов под углом 90° друг к другу; допускается применение одного радиуса при проведении испытаний в закрытом помещении без ветра.

Измеряют эффективный радиус орошения. Отклонение значения эффективного диаметра орошения от значения, установленного изготовителем, должно быть не более ±5%.

*R fmgf[r lsO[dk[w tf[ts tstf[tqj hnj dgj dk[[k [r fmgslsr lstqO[j$lstscf[f* (для дождевальных аппаратов с низким углом траектории).

Измеряют высоту траектории струи при работе дождевального аппарата при испытательном давлении, минимальном эффективном давлении и максимальном эффективном давлении.

Высота траектории струи воды не должна превышать высоту, установленную изготовителем.

*R fmgf[r lsO[dk[w o hcf[Of[O[tscdgj ,WWj$lscf[odz;=hO[odgj dk[[?*

Перед проведением испытания выдерживают дождевальный аппарат в воде температурой 60 °С в течение 1 ч. После этого дождевальный аппарат должен проработать в течение 10 мин при испытательном давлении. Устанавливают дождевальный аппарат на стояке в соответствии с рекомендациями изготовителя для работы в полевых условиях. Увеличивают давление от нуля до давления, при котором дождевальный аппарат начинает вращаться равномерно в одном направлении. Выдерживают дождевальный аппарат при этом давлении в течение 2 мин. Увеличивают постепенно давление до максимального эффективного давления $P_{\max}$. Выдерживают дождевальный аппарат в данных условиях в течение 1 мин. Повторяют испытания с дождевальным аппаратом, отклоненным на угол 10° от вертикального положения.

Дождевальные аппараты должны вращаться согласованно в одном направлении во всем диапазоне эффективных давлений – от минимального до максимального.

ГОСТ ИСО 7749-2 устанавливает правила испытаний по определению равномерности орошения.

**Общие условия испытаний [78]**

*t Ofnjftsdtsyl j dkfj cffnjfr ls Ols j dz dzscts lzyOfnjs ?O*

Испытательный участок, на котором расположены дождемеры, должен быть ровным (максимально допустимый уклон 1%). Участок не должен иметь препятствий, которые могут помешать свободному распределению воды.

Рядом с участком не должно быть деревьев или препятствий, т.к. они могут изменять поток воздуха над испытательным участком. Испытательный участок может располагаться в защищенном, закрытом помещении или на защищенном извне пространстве.

*? tsdkfjs tezh?yqfw nhtsyl nj dzj tetse*

Дождемеры для сбора воды [79], распыляемой дождевальным аппаратом, должны иметь в верхней части цилиндрическую форму не менее чем на одну треть высоты. Все дождемеры должны иметь одинаковую форму и размеры, наружные кромки должны быть острыми, без видимых деформаций. Дождемеры должны иметь такую конструкцию, чтобы собираемая вода не разбрызгивалась. Высота дождемеров – не менее 15 см, но не менее двойной средней высоты воды, собираемой при испытаниях. Диаметр дождемера должен составлять половину его высоты, но не менее 8,5 см.

Дождемеры, предназначенные для сбора воды и подачи в измерительное приспособление, должны иметь приемную часть с острой кромкой и диаметром не менее 8,5 см. Дождемеры должны быть цилиндрической или конической (расширяющейся вверх) формы с углом наклона боковых стенок не менее 45° к горизонтали.

Допускается применение дождемеров других типов при условии, что они обеспечивают погрешность измерения не менее, чем дождемеры, оговоренные выше.

Плоскость приемных отверстий должна быть параллельна земле с погрешностью ±5°, а перепад высот рядом расположенных дождемеров не должен превышать 2 см.

*v fnjs Odtse?Ohtsyl nj eOdz dzscts Ofjf OteOls Ohdzw cffnjfr ls Odkfj?*

Новые дождевальные аппараты перед испытаниями должны проработать при испытательном давлении в течение 1 ч.

Устанавливают дождевальный аппарат на стояке с диаметром соединения, совместимым с резьбой на дождевальном аппарате. Необходимо обеспечить, чтобы стояк был установлен вертикально и не отклонялся или изгибал-

ся во время испытаний. Максимальное допустимое отклонение от вертикального положения – не более 1°.

Высота расположения основной насадки дождевального аппарата относительно приемных отверстий дождемеров должна составлять не менее десяти номинальных диаметров дождевального аппарата, но не менее 50 см.

Дождевальный аппарат, для которого изготовитель рекомендует различную высоту орошения, например, выдвижной дождевальный аппарат, испытывают на высоте расположения основной насадки дождевального аппарата над приемными отверстиями дождемеров, указанной изготовителем как высота, рекомендуемая для правильного использования.

Фильтр устанавливают на линии питания до вывода для подключения манометра. Размер ячейки фильтра должен быть таким, чтобы пропускаемые частицы имели размер не более 30% размера меньшей оси выходного сечения дождевального аппарата.

ʀ ʟdʒi tɑj dʁʃj ʟfɳdtsɔɕʔ tsɬtɛdzɣ Oˠ ʱ jɬʔ fɳɡj нʳ

Перед проведением испытаний и в процессе испытаний с интервалами не более 15 мин следует измерять скорость ветра и его направление. Измерения проводят в открытом поле. Скорость ветра во время испытаний должна соответствовать требованиям ИСО 7749-1:1995 (таблица 5.1). Изменение направления ветра должно быть не более 20° при скорости ветра более 0,4 м/с. Измерения показателей ветра должны быть выполнены на расстоянии не более 50 м от границы испытательного участка на высоте приблизительно 90% максимальной высоты траектории, но не менее 2 м. Скорость ветра должна быть указана в протоколе испытаний.

Относительная влажность и температура окружающей среды должны быть измерены во время испытаний.

ʜ tɑj нfɳs ɔOɕɻʟdʒi tɑj dʁʃɬʔ ɕˈ ʟfɳdtsɔɕʷ ɕffɳɡʳ ls Oɔʁʃʔ

Испытательное давление должно быть измерено на высоте основной насадки испытуемого дождевального аппарата (рисунок 5.1). Точка, в которой измеряют давление, должна быть расположена на расстоянии не менее 20 см от дождевального аппарата, так чтобы локальные изменения не сказывались на показаниях манометра.

Между точкой измерения давления и дождевальным аппаратом не должно быть расположено никаких устройств и приборов, которые могут вызвать снижение давления.

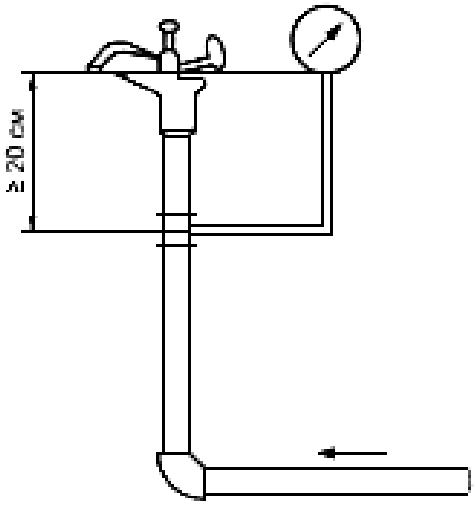



Рисунок 5.1 – Измерение давления в дождевальном аппарате

Во время испытания давление не должно изменяться более чем на ±4%. Допустимая погрешность средств измерений от действительного значения должна соответствовать таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Погрешность измерения

| Измеряемый показатель | Погрешность |
|---|---|
| Расход воды | ±2% |
| Давление | ±2% |

Скорость ветра и его направление должны быть измерены чашечным суммирующим анемометром, снабженным флюгером или другим устройством определения направления ветра или любым другим устройством.

Относительная влажность и температура окружающей среды должны быть измерены стандартными средствами измерения, используемыми на метеорологических полевых станциях для измерения данных параметров.

*1 tatsнtsdzq clls j dz dasfnjs ˩ cffnjf r ls Odaqfw*

Продолжительность испытаний должна быть не менее 1 ч.

*t Ofnjj ls cldas j dfnqfodasfnjs cf tstatsh j dafw*

Интенсивность орошения $P_r$, мм/ч, рассчитывают по следующей формуле:

$$P_r = \frac{q \cdot 1000}{S_i \cdot S_m}, \qquad (5.2)$$

где $q$ – расход воды, м$^3$/ч;

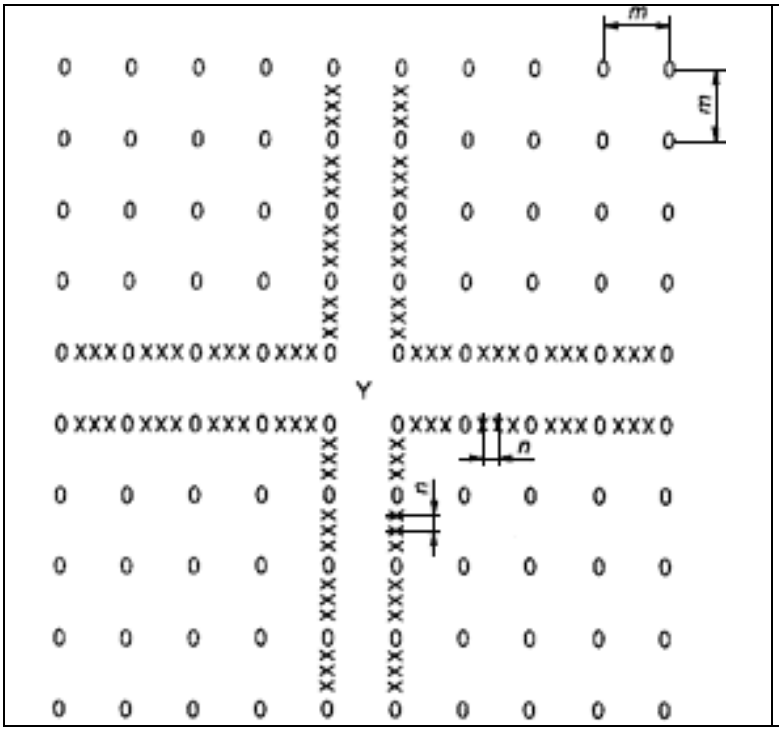
$S_i$ – расстояние между боковыми отводами, м;

$S_m$ – расстояние между дождевальными аппаратами, м.

**Полнополевой метод**

Устанавливают стояк с дождевальным аппаратом в центре испытательного участка на пересечении диагоналей, проведенных из углов испытательного участка (рисунок 5.2).

Расстояние между дождемерами должно быть установлено, как показано на рисунке 5.2. Допустимые отклонения от шага должны быть не более 5 см в любом направлении. Область размещения дождемеров должна быть достаточной, чтобы обеспечить полный охват зоны орошения с учетом необходимого дополнительного запаса по краям участка.




*m* = 2 м для дождевальных аппаратов с диаметром орошения более 10 м;
*m* = 1 м для дождевальных аппаратов с диаметром орошения 10 м и менее;
*n* = 0,5 м; Y – дождевальный аппарат; 0 – дождемер для определения распределения воды; X – дождемер для определения диаметра орошения (см. ИСО 7749-1).
*1 tæ[dzj ų(Odkæ[j :* метод измерения диаметра орошения установлен в ИСО 7749-1.

Рисунок 5.2 – Пример расположения дождемеров при испытаниях дождевального аппарата по определению равномерности и диаметра орошения полнополевым методом

Расстояние между дождемерами должно быть установлено, как показано на рисунке 5.2. Допустимые отклонения от шага должны быть не более 5 см в любом направлении. Область размещения дождемеров должна быть достаточной, чтобы обеспечить полный охват зоны орошения с учетом необходимого дополнительного запаса по краям участка.

**Радиальный метод**

Данный метод следует применять только при отсутствии ветра.

Устанавливают дождемеры по прямой линии, проведенной от центра испытуемого дождевального аппарата. Максимальные расстояния между

дождемерами вдоль линии должны соответствовать приведенным в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Расстояние между дождемерами

| Максимальное расстояние между дождемерами, м | Диаметр орошения, м |
|---|---|
| 1 | ≤ 20 |
| 2 | > 20 |

Количество дождемеров на линии должно быть достаточным, чтобы охватить полный радиус орошения дождевального аппарата с учетом дополнительного запаса по радиусу.

Во время испытания стояк, на который установлен дождевальный аппарат, должен вручную поворачиваться на четверть оборота (90°) вокруг своей оси три раза за равные промежутки времени. Поворот должен осуществляться, когда струя воды дождевального аппарата находится не над дождемерами.

**Равномерность орошения**

Дождевальный аппарат предназначен для достижения равномерного орошения данного участка земли. Каждый дождевальный аппарат имеет свою характеристику распределения, которая зависит от давления воды и размера насадки. Различные дождевальные аппараты имеют различные характеристики распределения. Равномерность орошения зависит от характеристик распределения и расстояния между дождевальными аппаратами. Следовательно, существует необходимость сравнения равномерности орошения различных дождевальных аппаратов при различных условиях эксплуатации.

Христиансен [63, 67] вывел следующую формулу для расчета коэффициента равномерности орошения ($CDU$):

$$CDU = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum |h_m - h_i|}{n \cdot h_m}\right), \qquad (5.3)$$

где $n$ – количество измерений;

$h_m$ – среднеарифметическое значение измерений;

$h_i$ – измерение каждого дождемера;

$\sum |h_m - h_i|$ – сумма абсолютных значений каждого отклонения измерения от среднего значения.

Коэффициент равномерности орошения рассчитывают по результатам испытаний распределения воды дождевальным аппаратом в полевых условиях. Дождемеры одного размера и формы располагают на одинаковом рассто-

нии друг от друга в определенном порядке на испытательном участке. Основой для расчета коэффициента является количество собранной воды в каждом дождемере.

Равномерность орошения с учетом зон перекрытия при различных расстояниях между дождевальными аппаратами определяют путем имитации полевых условий (на основе схемы распределения, полученной одним дождевальным аппаратом, испытанным полнополевым методом). Коэффициент равномерности орошения для различных расстояний между дождевальными аппаратами определяют следующим образом:

а) дождемеры устанавливают, как показано на рисунке 5.2;

б) измеряют количество воды в дождемерах при работе дождевального аппарата в соответствии с условиями настоящего стандарта;

в) регистрируют количество собранной воды;

г) определяют перекрытие, т.е. суммарное количество воды, которое было бы собрано дождемерами, если бы они были расположены между четырьмя дождевальными аппаратами, идентичными испытываемому дождевальному аппарату, для которого коэффициент равномерности орошения определен. Затем рассчитывают коэффициент равномерности орошения по формуле Христиансена.

Коэффициент равномерности орошения 100% означает абсолютно равномерное распределение воды по всему полю. Более низкое значение в процентах указывает на худшие уровни равномерности орошения.

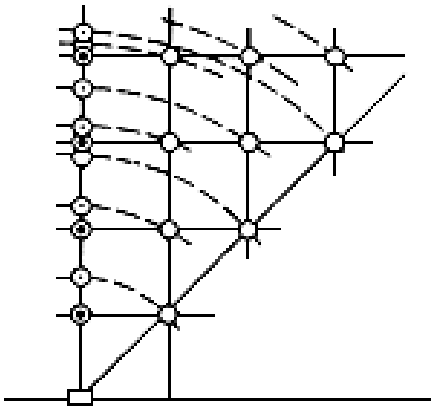
Испытание дождевальных аппаратов радиальным методом и расчет коэффициента равномерности орошения выполняют следующим образом:

а) дождемеры устанавливают на равных расстояниях вдоль радиуса, проведенного от места установки дождевального аппарата;

б) измеряют количество воды в дождемерах при работе дождевального аппарата в соответствии с условиями настоящего стандарта;

в) рассчитывают количество воды, собранной в имитируемых дождемерах, расположенных вдоль радиуса, который представляет их расположение (т.е. их расстояние от испытуемого дождевального аппарата), если бы они были установлены в соответствии с полнополевым методом (рисунок 5.3). Приведенное выше количество воды представляет количество, которое было бы собрано в соответствующих дождемерах, если бы они были установлены в соответствии с полнополевым методом, а также показывает схему распределения воды испытуемого дождевального аппарата;

г) имитируя расстояние между дождевальными аппаратами в соответствии с расстоянием, для которого коэффициент равномерности орошения определен, рассчитывают суммарное количество воды, которое было бы собрано дождемерами, если бы они были расположены между четырьмя дождевальными аппаратами, идентичными испытуемому. Затем определяют коэффициент равномерности орошения по формуле Христиансена.



– расположение дождемеров вдоль радиуса;

– имитация расположения дождемеров, представляющих расположение дождемеров по полнополевому методу. Количество воды в имитируемых дождемерах рассчитывают в зависимости от радиального расстояния от испытуемого спринклера;

– расположение дождемеров в соответствии с полнополевым методом для вычисления коэффициента равномерности орошения с учетом перекрытия;

– расположение дождевального аппарата.

*1 tacfdzj ycOdkfj :* показана только 1/8 часть круга.

Рисунок 5.3 – Схема расположения дождемеров при определении диаметра орошения и при расчете равномерности орошения с учетом перекрытия

Рекомендации стандарта по определению равномерности орошения являются важным этапом в научном познании, но применимы только для стационарных систем и машин фронтального прерывистого перемещения.

Применимость испытанного аппарата для машин непрерывного фронтального и вращательного движения следует выполнять по другим алгоритмам. Кроме того, изложенный в стандарте алгоритм, допускает графическую интерполяцию и ручное суммирование осадков в зонах перекрытия.

Далее нами усовершенствованы алгоритмы обработки результатов испытания аппарата радиальным методом с применением системы компьютерной математики MathCad для оценки его применимости в машинах различных типов.

## 5.2. Расчет показателей равномерности дождевания стационарными системами и машинами позиционного действия по результатам испытания аппарата радиальным методом

Кроме показателя равномерности по Христиансену применяют и другие показатели.

Коэффициент вариации дозы орошения оценивает равномерность более жестко по сравнению с коэффициентом Христиансена. Он применяется для оценки равномерности посева и внесения удобрений.

Равномерность орошения площади по рекомендации РД 10.11.1-89 [67, 75, 81] оценивают коэффициентами эффективного, недостаточного и избыточного поливов.

Коэффициент эффективного полива вычисляют как отношение площади эффективного полива к общей поливной площади.

Коэффициент недостаточного полива вычисляют как отношение площади недостаточного полива к общей поливной площади.

Коэффициент избыточного полива определяют как отношение площади избыточного полива к общей площади.

Площадью эффективного полива считается площадь, политая в допустимых пределах (±25%) отклонения от средней интенсивности или среднего слоя дождя.

Недостаток алгоритма по ГОСТ ИСО 7749-2 состоит в применении ручных операций интерполирования и суммирования слоя осадков в зоне перекрытия.

Устранить недостаток можно разработкой алгоритма и программы оптимизации шага установки аппаратов.

Для оценки равномерности дождевания машинами позиционного действия и стационарными дождевателями нами рекомендуется использовать усовершенствованный алгоритм математического моделирования:

- результаты испытания аппарата заносят в компьютер в виде двух векторов: *IR* – интенсивность дождевания в дождемерах, расположенных на различном расстоянии от аппарата; *R* – расстояние дождемера от аппарата;

- получают интерполяционную формулу зависимости интенсивности дождевания от радиуса;

- создают матрицу координат имитируемых дождемеров на зачетной площадке по схеме полнополевого опыта, то есть расположенных в центрах метровых квадратов, равномерно распределенных между позициями четырех аппаратов. На зачетную площадку попадает вода только от четырех аппаратов при условии, если шаг их установки больше радиуса орошения;

- вычисляют расстояния площадок матрицы от каждого из четырех аппаратов;

- вычисляют интенсивности дождевания на каждой площадке от четырех аппаратов;

- вычисляют матрицу доз полива в каждом дождемере суммированием доз от каждого из четырех аппаратов. Так как площадки метровые, то доза получается умножением интенсивности на время. Оценку равномерности можно выполнять по равномерности доз или по равномерности интенсивностей. Результат будет одинаков;

- вычисляют среднеарифметическое значение дозы по матрице;

- вычисляют матрицу модулей отклонений каждого значения дозы от среднего;

- вычисляют коэффициент Христиансена;

- задают цикл изменения шага установки аппаратов, т.е. расстояния между позициями аппаратов;

- расчет повторяют при различном шаге установки аппаратов;

- строят график зависимости коэффициента Христиансена от шага установки аппаратов;

- определяют оптимальный шаг установки аппаратов;

- основой для программы служат разработанные ранее программы моделирования процессов дождевания [3, 4, 63, 66, 72, 81].

При расстоянии между позициями меньшем радиуса зоны дождевания необходимо суммировать дозы полива от двенадцати или шестнадцати аппаратов, расположенных вокруг зачетной площадки. При оценке работы машин непрерывного фронтального и кругового действия необходимы другие алгоритмы расчета равномерности.

Покажем пример обработки результатов испытания аппарата i-Wob фирмы Senninger. В рекламном проспекте фирмы приведен график зависимости интенсивности дождевания от радиуса. Выполним отсчет интенсивностей по графику через 0,5 м. Создадим векторы *IR* и *R* (рисунок 5.4). Выполняем сплайн интерполяцию результатов испытания [67, 75]. Для этого вычисляем коэффициенты *KSI* кубической интерполяции. Далее вычислим значения функция *A(r)*, строим графики исходных результатов *IR* и *A(r)*. Количество промежуточных точек вычисления функции *A(r)* в пять раз больше, чем у вектора *IR*. Аппроксимирующая функция точно проходит через эмпирические точки.

Для использования функции *A(r)* в программе расчета равномерности её вычисление оформлено подпрограммой *I(r)*.

Далее по программе *Kes(A)* (приложение П) вычисляем коэффициенты Христиансена и эффективного полива [81]. Результаты расчетов представим графиками (рисунок 5.5).

$IR^T = (15.2\ \ 12.3\ \ 9.7\ \ 8\ \ 6.8\ \ 6.8\ \ 7.6\ \ 8\ \ 8.5\ \ 8\ \ 7.8\ \ 7.2\ \ 6.8\ \ 7.2\ \ 6.8\ \ 4.2\ \ 1.2)$

$R^T = (0\ \ 0.5\ \ 1\ \ 1.5\ \ 2\ \ 2.5\ \ 3\ \ 3.5\ \ 4\ \ 4.5\ \ 5\ \ 5.5\ \ 6\ \ 6.5\ \ 7\ \ 7.5\ \ 8)$

$KSI := cspline(R, IR) \qquad r := (0, 0.25..8) \qquad A(r) := interp(KSI, R, IR, r) \qquad i := 0..16$

$A(R)^T = (15.2\ \ 12.3\ \ 9.7\ \ 8\ \ 6.8\ \ 6.8\ \ 7.6\ \ 8\ \ 8.5\ \ 8\ \ 7.8\ \ 7.2\ \ 6.8\ \ 7.2\ \ 6.8\ \ 4.2\ \ 1.2)$

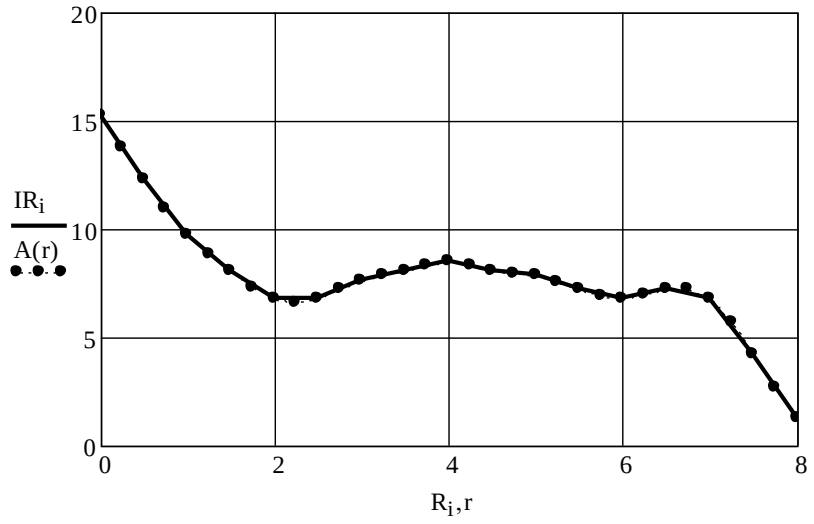



Рисунок 5.4 – Аппроксимация результатов испытания аппарата i-Wob

$i := 0..3 \qquad j := 0..6 \qquad B_j := j + 6 \qquad CDU_j := KeS(B_j)_0 \qquad Kef_j := KeS(B_j)_2 \qquad M_{i,j} := KeS(B_j)_i$

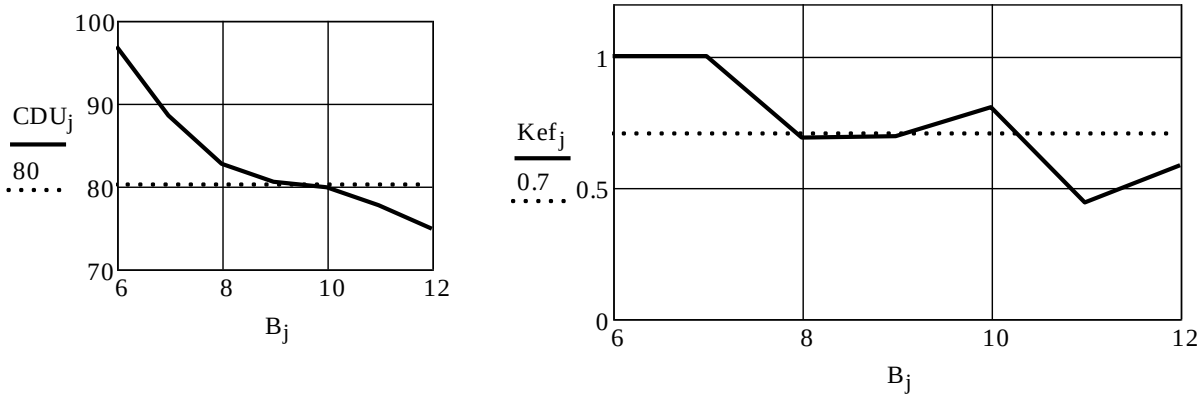



Рисунок 5.5 – Графики зависимости коэффициентов равномерности Христиансена и эффективного полива от шага установки аппаратов

Коэффициент равномерности полива Христиансена более 95% при шаге установки менее шести метров, однако при таком шаге требуется учет воды от 12 аппаратов, расположенных вокруг зачетной площадки. Коэффициент меньше 80% – при шаге установки аппаратов большем 10 м.

Коэффициент эффективного полива имеет более резкие колебания. Менее агротехнической нормы 0,7 он равен при шаге установки более 10,2 м. Однако в диапазоне 8...9 м его значение несколько меньше – 0,7.

Сравнение графиков показывает, что оценки равномерности по коэффициенту Христиансена и по коэффициенту эффективного полива дают сходные результаты.

Приведем другой пример обработки результатов испытания аппарата в более сложном варианте.

Результаты испытания среднеструйного двухсоплового аппарата показаны на рисунке 5.6.

$$R1^{T} = (0\ \ 1\ \ 2\ \ 3\ \ 4\ \ 5\ \ 6\ \ 7\ \ 8\ \ 9\ \ 10\ \ 11\ \ 12\ \ 13\ \ 14\ \ 15\ \ 16)$$

$$I1R^{T} = (0.16\ \ 1.59\ \ 3.86\ \ 6.72\ \ 6\ \ 4.93\ \ 6.09\ \ 7.95\ \ 8.46\ \ 8.09\ \ 6.19\ \ 4\ \ 2.98\ \ 1.42\ \ 1.11\ \ 0.16\ \ 0.32)$$

$$KSI := cspline(R1, I1R)$$

$$r := (0, 0.5 .. 16)$$

$$A1(r) := interp(KSI, R1, I1R, r)$$

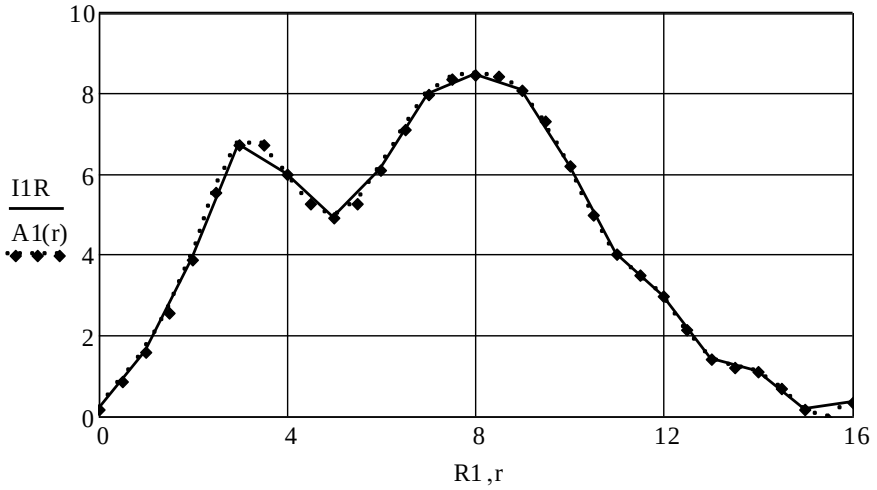



Рисунок 5.6 – Результаты испытания двухсоплового аппарата и их аппроксимация

Результат расчета показателей равномерности приведен на рисунке 5.7.

Из-за малой интенсивности дождевания под аппаратом агротехнические нормативы по равномерности выполняются только при шаге установки менее 8 м. Такой аппарат практически непригоден для стационарных систем и машин, работающих позиционно.

Однако такой аппарат может быть вполне пригодным для машин непрерывного перемещения. Это свидетельствует о недостаточной проработке стандарта ГОСТ ИСО 7749-2-2004. Его необходимо расширить описанием алгоритмов расчета равномерности для машин непрерывного перемещения.

$i := 0..3 \quad j := 0..10 \quad B_j := j + 6 \quad CDU_j := KeS(B_j)_0 \quad Kef_j := KeS(B_j)_2 \quad M_{i,j} := KeS(B_j)_i$

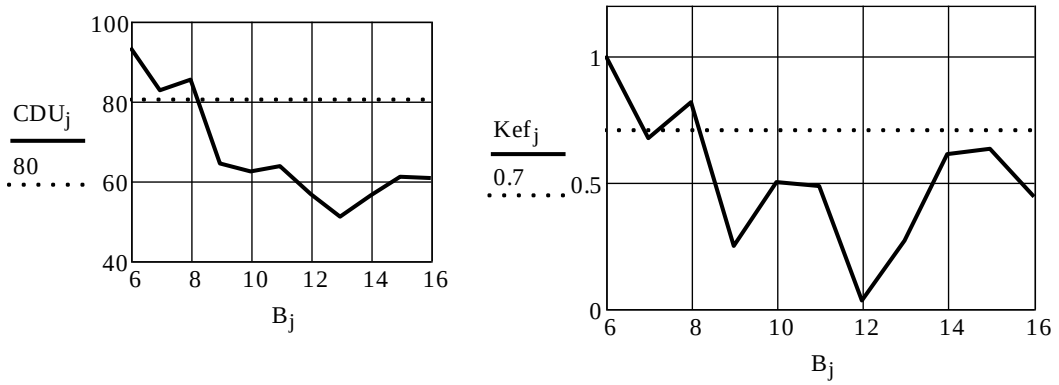



Рисунок 5.7 – Показатели равномерности дождевания аппаратом, рассчитанные по результатам рисунка 5.6

Предложен усовершенствованный алгоритм расчета показателей равномерности дождевания по результатам испытания аппаратов радиальным методом.

Программа *Kes(A)* реализует усовершенствованный алгоритм, позволяет выбрать оптимальный шаг установки аппаратов [81].

Для оценки применимости аппаратов в машинах непрерывного перемещения, стандарт ГОСТ ИСО 7749-2-2004 необходимо дополнить. В стандарт необходимо включить описания алгоритмов расчета равномерности дождевания при фронтальном и круговом перемещениях машин.

Оптимальный шаг установки аппаратов i-Wob равен 9,5 м.

Расчет равномерности дождевания по четырем позициям аппаратов пригоден только при шаге установки большем радиуса орошения.

### 5.3. Расчет равномерности дождевания машиной непрерывного поступательного движения по результатам испытания аппарата радиальным методом

Приводим описания моделей расчета равномерности дождевания машинами непрерывного поступательного движения с аппаратами, испытанными радиальным методом.

Для оценки равномерности дождевания машинами непрерывного поступательного перемещения рекомендуется использовать следующий алгоритм математического моделирования:

- результаты испытания аппарата заносят в компьютер в виде двух векторов: *IR* – интенсивность дождевания в дождемерах, расположенных на различном расстоянии от аппарата; *R* – расстояние дождемера от аппарата;

- получают интерполяционную формулу зависимости интенсивности дождевания от радиуса;

- создают матрицу координат имитируемых дождемеров на зачетной площадке по схеме полнополевого опыта. Зачетной площадкой при расчете равномерности принимаем полосу между двумя смежными аппаратами, отстоящими друг от друга на расстоянии B (рисунок 5.8). Первый аппарат при этом расположен в начале координат, а второй – имеет координаты (+B, 0). Размер площадки по оси Y равен двум радиусам орошения. Имитируемые дождемеры расположены в центрах метровых квадратов, равномерно распределенных между позициями двух аппаратов. Это условие выполняется, если шаг установки принять целым числом. На зачетную площадку попадает вода только от двух аппаратов при условии, если шаг установки больше радиуса орошения (рисунок 5.8 *в*). Если шаг установки меньше радиуса орошения (рисунок 5.8 *г*), то часть дождя от первого и от второго аппаратов не попадает на зачетную площадку (площади $F_1$). Для полного учета воды, попадающей на зачетную площадку, необходимо моделировать работу третьего и четвертого аппаратов. Площадки $F_1$ и $F_2$ равны, поэтому на зачетную площадь попадает вода, количество которой равно расходу через аппарат, умноженному на время прохождения зачетной площади;

- вычисляют расстояния площадок матрицы от каждого из аппаратов;

- вычисляют интенсивности дождевания на каждой площадке от каждого аппарата;

- вычисляют суммы интенсивностей от четырех аппаратов;

- вычисляют матрицу доз полива в каждом дождемере умножением интенсивности на время прохождения машиной одного метра, то есть делением интенсивности на скорость поступательного движения машины. Оценку равномерности можно выполнять по равномерности доз или по равномерности интенсивностей. Результат будет одинаков;

- имитируют поступательное движение машины суммированием доз на линиях, параллельных оси Y. Получают вектор доз $Q(X)$;

- вычисляют среднеарифметическое значение дозы по вектору доз;

- вычисляют вектор модулей отклонений каждого значения дозы от среднего;

- вычисляют коэффициент Христиансена;

- задают цикл изменения шага установки аппаратов, т.е. расстояния между аппаратами на трубопроводе;

- расчет повторяют при различном шаге установки аппаратов;

- строят график зависимости коэффициента Христиансена от шага установки аппаратов;

- определяют оптимальный шаг установки аппаратов.

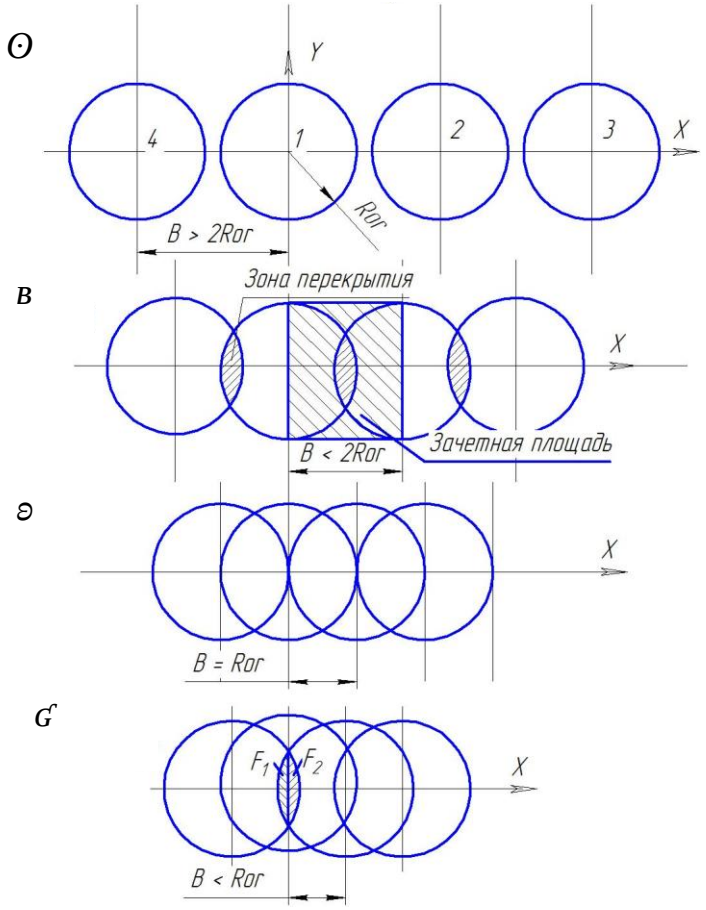



Рисунок 5.8 – Схемы зон орошения при различных расстояниях между аппаратами

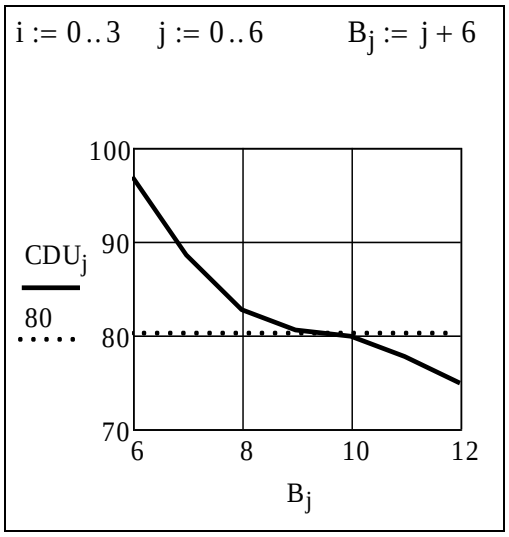
Основой для разработки программы расчета равномерности служат опубликованные ранее результаты моделирования процессов дождевания [61, 62, 63, 81]. Программа [75] (приложение Р) реализует усовершенствованный алгоритм расчета равномерности дождевания машиной непрерывного поступательного перемещения по результатам испытания аппарата радиальным методом.

Покажем пример обработки результатов испытания аппарата i-Wob фирмы Senninger [14, 75] (рисунок 5.4). Далее по программе *CDUP(A)* выполняем имитацию поступательного движения, получаем вектор доз $Q(X)$, вычисляем коэффициент Христиансена. Результаты расчетов представим графиком (рисунок 5.9 *в*).

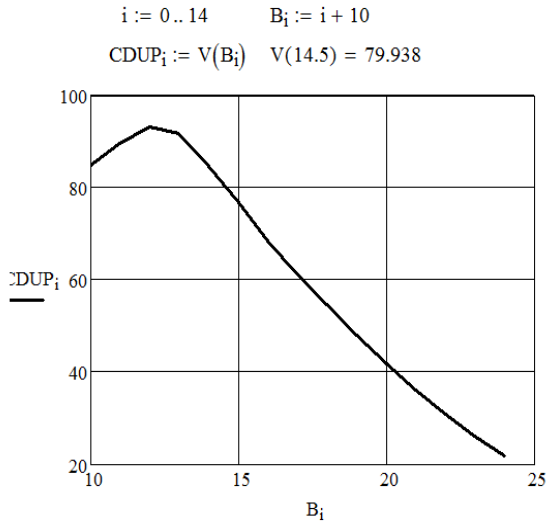
Коэффициент равномерности полива Христиансена около 95% получен при шаге установки 12,5 м, а линию 80% график пересекает при шаге 14,5 м. В стационарной системе (рисунок. 5.9 *а*) показатель Христиансена меньше 80% только при шаге 9,5 м.

В случае непрерывного поступательного движения продольная неравномерность нивелируется и за счет этого можно допустить большее значение поперечной неравномерности. Шаг установки можно увеличить в полтора раза.

Покажем второй пример расчета для аппарата, который по требованиям стандарта ГОСТ ИСО 7749-2-2004 не обеспечивает выполнения агротехнического допуска на стационаре. На рисунке 5.7 приведены графики зависимости коэффициента Христиансена. Агротребования выполняются только при шаге установки в два раза меньшем радиуса орошения.



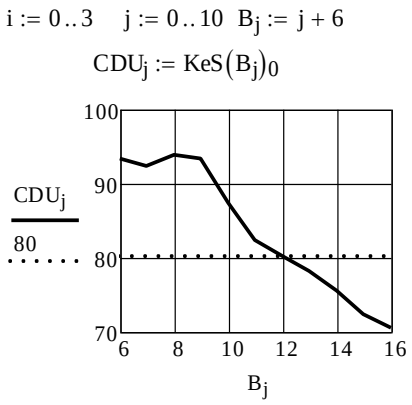

*Ѳ*– стационарные

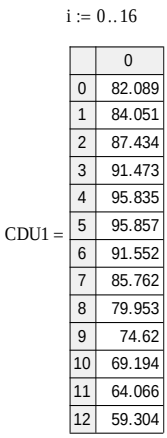


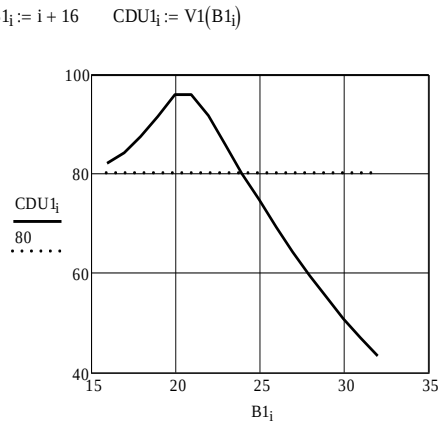

*в* – на трубопроводе

Рисунок 5.9 – Графики зависимости коэффициента равномерности от расстояния между аппаратами машины непрерывного поступательного движения

Результат расчета показателей равномерности среднеструйного двухсоплового аппарата на машине непрерывного поступательного движения по рисунку 5.6. приведен на рисунке 5.10.




*Ѳ*– стационарные аппараты *в* – на машине поступательного движения

Рисунок 5.10 – Графики показателя равномерности дождевания, рассчитанные по результатам испытаний аппарата на рисунке 5.6 в зависимости от шага установки

Агротехнические нормативы по равномерности выполняются при шаге установки менее 24 м (рисунок 5.10 *в*). По результатам расчетов, рекомендуемых стандартом, такой аппарат непригоден для стационарных систем и машин, работающих позиционно, так как при $B \geq 16$ м показатель равномерности менее 70% (рисунок 5.10 *б*).

Усовершенствованный алгоритм расчета показателей равномерности дождевания по результатам испытания аппаратов радиальным методом реализован в программе *CDU(A)* [75], позволяет выбрать оптимальный шаг установки аппаратов.

Алгоритм расчета показателей равномерности при шаге установки аппаратов на трубопроводе, большем радиуса орошения аппарата, моделирует работу двух аппаратов. При шаге установки аппаратов, меньшем радиуса орошения аппарата, моделируется работа четырех смежных аппаратов.

ГОСТ ИСО 7749-2-2004 необходимо дополнить предлагаемым алгоритмом расчета равномерности дождевания при фронтальном поступательном перемещении машины.

Оптимальный шаг установки аппаратов i-Wob равен 14,5 м, что в 1,75 раза больше радиуса орошения аппарата и в 1,5 раза больше шага установки стационарных аппаратов при таком же допуске на равномерность.

Двухсопловый аппарат, который по оценке стандарта не удовлетворяет требованиям равномерности орошения при $B \geq 16$ м, на машине поступательного движения обеспечивает качественное распределение при шаге установки менее 24 м.

## 5.4. Расчет равномерности дождевания машиной непрерывного вращательного движения по результатам испытания аппарата радиальным методом

Схема обозначений в настоящем разделе применена по рисунку 4.1:

$R1, R2, R3, R4$ – расстояния от аппаратов до неподвижной опоры;

$Ro1, Ro2, Ro3, Ro4$ – радиусы орошения аппаратов;

$\rho 1, \rho 2, \rho 3, \rho 4$ – расстояния от аппаратов до точки, в которой определяется интенсивность дождевания.

Используем результаты испытания аппарата, представленные на рисунке 5.4, для моделирования его применимости на машине вращательного движения.

Для оценки равномерности дождевания машинами непрерывного вращательного перемещения рекомендуется использовать следующий алгоритм математического моделирования:

- результаты испытания аппарата заносят в компьютер в виде двух векторов: IR – интенсивность дождевания в дождемерах, расположенных на различном расстоянии от аппарата; R – расстояние дождемера от аппарата;

- получают интерполяционную формулу $I(\rho)$ зависимости интенсивности дождевания от радиуса, оформляют зависимость в виде подпрограммы;

- создают матрицу координат имитируемых дождемеров на дугах окружностей по схеме рисунка 4.1. Зачетной линией при расчете равномерности принимаем полосу на оси *X* между первым и вторым аппаратами, отстоящими друг от друга на расстоянии *B*. Первый аппарат расположен в начале координат, второй – имеет координату $X = +B$, третий – $X = +2B$, четвертый – $X = -B$.

Определим дозу орошения в дождемерах на линии между первым и вторым аппаратами после прохода через них облака дождя.

Математическая модель интенсивностей от четырех аппаратов при отсутствии вращения трубопровода на интервале между первым и вторым аппаратами в виде подпрограммы приведена на рисунке 5.11.

Интенсивности орошения вычисляются в точках на дугах окружностей, которые разделены на пятьдесят частей.

$$
\begin{aligned}
Z_i \leftarrow\ & \alpha_i \leftarrow -\alpha m + i \cdot \frac{2 \cdot \alpha m}{n} \\
& X_i \leftarrow (R1 + Xo_j) \cdot \cos(\alpha_i) - R1 \\
& Y_i \leftarrow (R1 + Xo_j) \cdot \sin(\alpha_i) \\
& \rho 1 \leftarrow \sqrt{(X_i)^2 + (Y_i)^2} \\
& I1 \leftarrow \begin{cases} I(\rho 1) & \text{if } \rho 1 - \max(R) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
& \rho 2 \leftarrow \sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_i)^2} \\
& I2 \leftarrow \begin{cases} I(\rho 2) & \text{if } \rho 2 - \max(R) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
& \rho 3 \leftarrow \sqrt{(X_i + B)^2 + (Y_i)^2} \\
& I3 \leftarrow \begin{cases} I(\rho 3) & \text{if } \rho 3 - \max(R) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
& \rho 4 \leftarrow \sqrt{(2 \cdot B - X_i)^2 + (Y_i)^2} \\
& I4 \leftarrow \begin{cases} I(\rho 4) & \text{if } (\rho 4 - \max(R)) < 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
& Z_i \leftarrow I1 + I2 + I3 + I4 \\
& Z_i
\end{aligned}
$$

Рисунок 5.11 – Программа вычисления интенсивностей в точках деления дуги окружности от четырех аппаратов

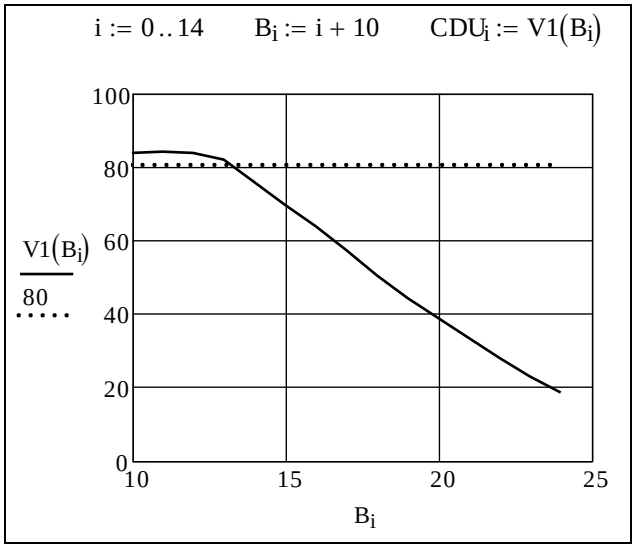
Номер точки обозначен буквой $i$ и задается в цикле при числе точек, например 50. Суммированием интенсивностей по дуге окружности имитируем вращательное движение машины. Текст программы *V1(B)* (Фрегат испытание) приведен в приложении П. Вывод результатов счета выполняется в двух вариантах. Если программа работает в варианте, приведенном в приложении, то выводится значение коэффициента равномерности по Христиансену (рисунок 5.12 *Θ*). Если в программе заменить последнюю команду на $V$, то программа выводит сумму интенсивностей (рисунок 5.12 *в*). Доза орошения получается умножением интенсивностей на время прохождения трубопроводом интервала угла $\Delta\alpha$, то есть на

$$\Delta t = \frac{a\sin(Ro1/R1)}{\pi}\cdot T\cdot 3600, \qquad (5.1)$$

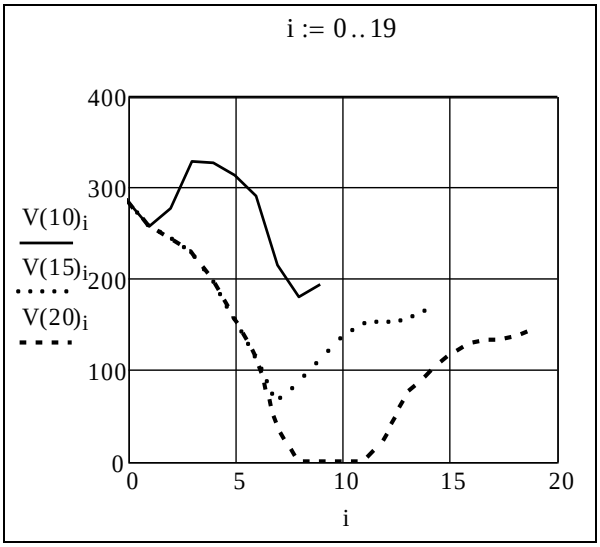
где $T$ – продолжительность полного оборота машины в часах.

При шаге установки аппаратов 10 м коэффициент равномерности более 80%. По графику (рисунок 5.12 *в*) можно сделать вывод об избыточном перекрытии зон дождевания. С увеличением расстояния между аппаратами в середине промежутка доза уменьшается. При установке аппаратов с одинаковым расходом, доза у правого аппарата уменьшается, так как орошаемая площадь увеличивается.

Если увеличить подачу воды на второй аппарат, то график дозы выравнивается (рисунок 5.13). В первом варианте уровень 80% коэффициент равномерности перешел при $B = 13{,}1$ м, во втором – при $B = 13{,}84$ м. Эффект повышения равномерности количественно подтвержден.

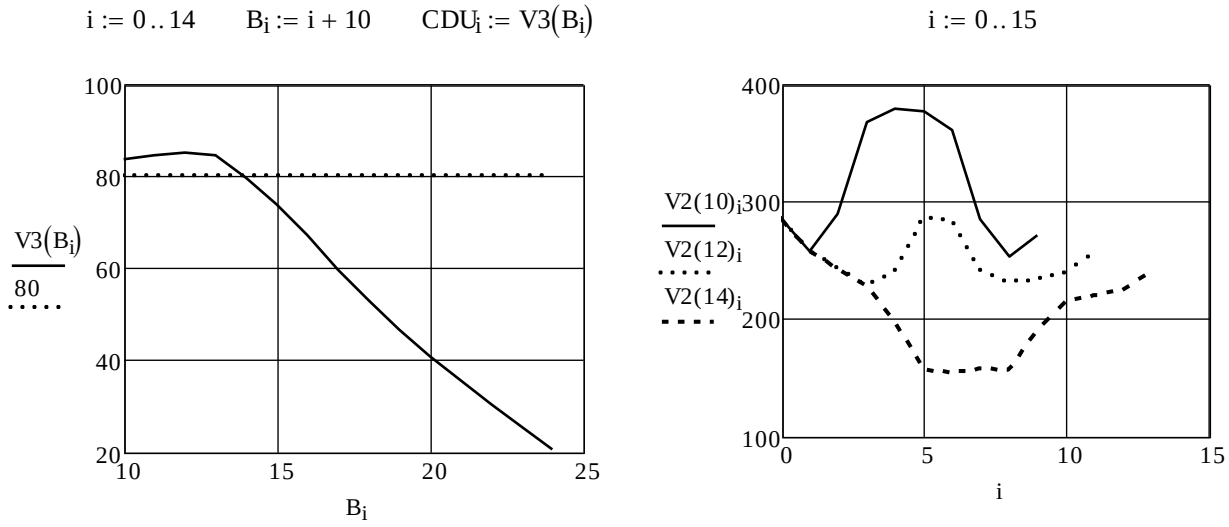



*Θ*– коэффициент Христиансена




*в* – сумма интенсивностей

Рисунок 5.12 – Вывод результатов счета программой:
«Фрегат испытание» при $Q1 = Q2$




*Ѳ*– коэффициент Христиансена *в* – сумма интенсивностей

Рисунок 5.13 – Вывод результатов счета программой:
«Фрегат испытание» при $Q1 = 1{,}4 \cdot Q2$

## 5.5. Методика исследования насадок секторного действия

Особенность методики исследований аппаратов и насадок секторного действия состоит в том, что плотность вероятности угла выброса частиц воды не следует закону равномерного распределения, и по результатам эксперимента необходимо определить характеристики распределения угла и дальностей полета частиц [59, 64, 71].

### 5.5.1. Описание экспериментальной установки

Для проведения экспериментальных исследований использовалось следующее оборудование:

- насосная станция;
- дождевальные насадки диаметром сопла 3, 5, 7, 9 мм;
- анеморумбометр М-63 с пультом;
- устройство для улавливания дождевых осадков (дождемер);
- мензурки 10 и 20 мл для определения объема осадков;
- манометр образцовый;
- секундомер;
- нивелир с нивелирной линейкой;
- линейки, рулетки.

Экспериментальная установка состоит из рамы с установленным на ней центробежным насосом 2, включенным в напорную сеть (рисунок 5.14). За-

бор воды происходит из резервуара 1. Вода в емкости накапливается из питающей скважины 7. Для подъема воды из скважины используется вибрационный насос НБ-1,0 с сетчатым фильтром 6. В напорной ветви трубопровода установлен манометр 4 и регулятор давления 3, с помощью последнего можно сбрасывать часть воды в заборную сеть для регулировки давления. Напорная сеть, изготовленная из труб 2", углублена на 1,5 м в землю с уклоном от площадки. В начале напорной сети есть кран 9 для слива воды в зимнее время. В центре экспериментальной площадки трубопровод выведен на поверхность и продолжается вертикальным стояком регулируемой высоты, на котором устанавливается дождевальная насадка 8.

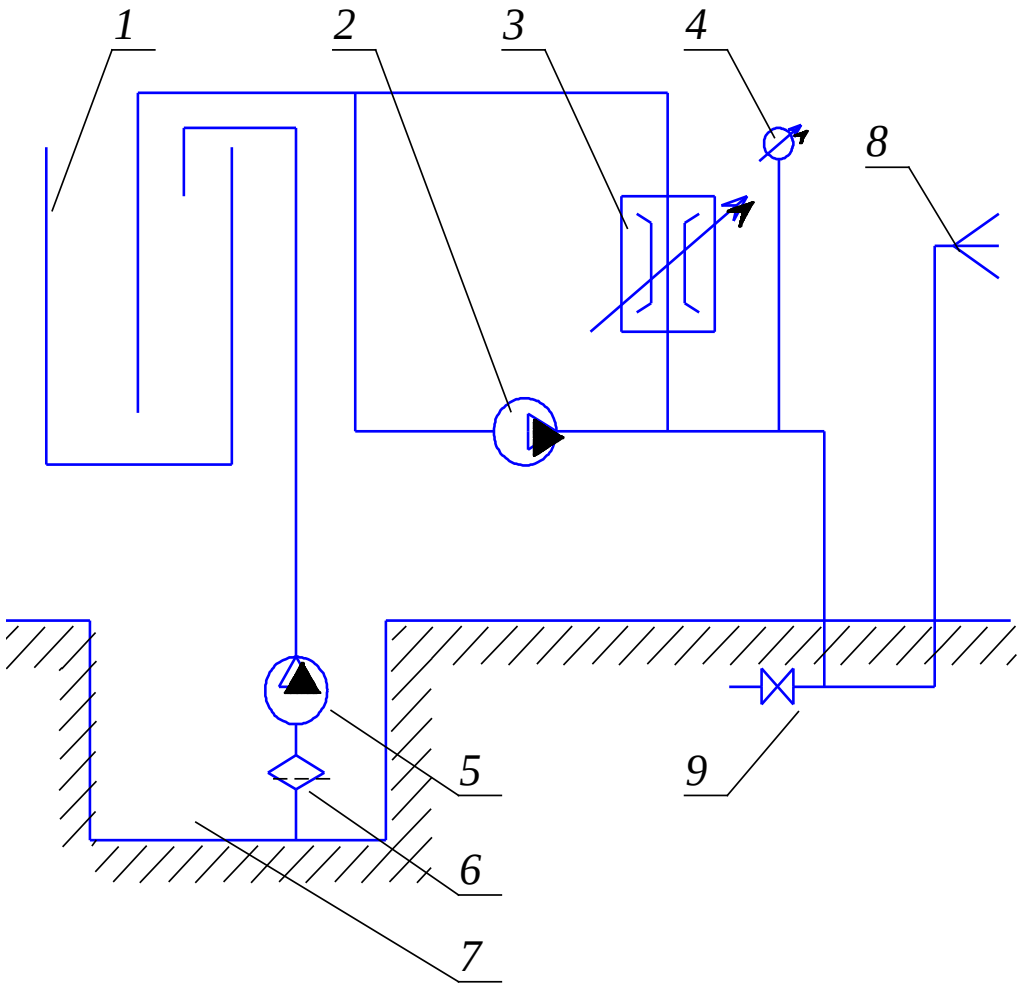
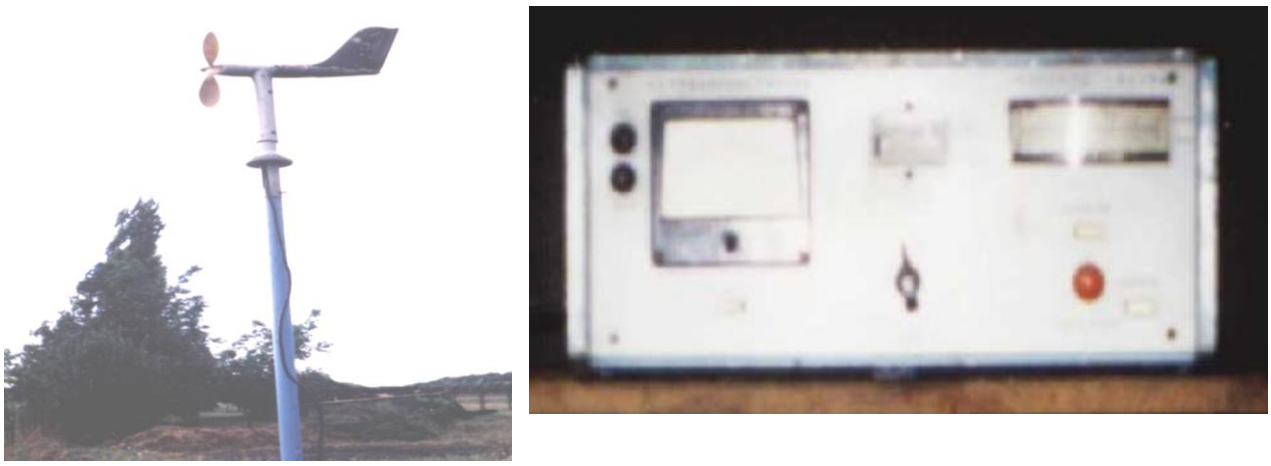



Рисунок 5.14 – Гидравлическая схема экспериментальной установки

Анеморумбометр М-63 (рисунок 5.15) состоит из пульта управления и датчика. Датчик установлен на высоте 3 м и вынесен для уменьшения действия помех от строения и лесополосы в сторону площадки.



*Ɵ* *в*

*Ɵ*– датчик анеморумбометра; *в* – пульт анеморумбометра

Рисунок 5.15 – Анеморумбометр М-63

Устройство для улавливания дождевых осадков, в дальнейшем – дождемер, состоит из пластмассового бачка в виде усеченного конуса и металлической подставки с пластмассовым оголовком (рисунок 5.16), который установлен свободно на горизонтальной оси и имеет овальную проушину для самоустановки дождемерного бачка в вертикальное положение.

Распределительный щит включает в себя пусковую и распределительную аппаратуру.

Насосная станция (рисунок 5.17) кроме насоса, дросселя и манометра имеет ротационный и объемный расходомеры для тарировки насадок.



Рисунок 5.16 – Устройство для улавливания осадков – дождемер



Рисунок 5.17 – Насосная станция

### 5.5.2. Методика лабораторных исследований

Для построения математической модели работы дождевальной машины при фронтальном движении необходимо с помощью эксперимента получить распределение осадков одной насадкой (рисунок 5.18). Перед началом опытов подготавливалась и нивелировалась предполагаемая площадь полива. По радиусам, расположенным через 30 градусов, устанавливались с шагом 0,5 м дождемеры. Слой осадков в точке дождемера определялся по формуле

$$h = \frac{V}{S_н},$$

где $V$ – объем осадков в дождемере, выпавших за время опыта, мм;

$S_н$ – приемная площадь дождемера, мм.

Интенсивность в каждой точке определяется по выражению

$$I = \frac{h}{t} = \frac{V}{S_н \cdot t},$$

где $t$ – продолжительность опыта.

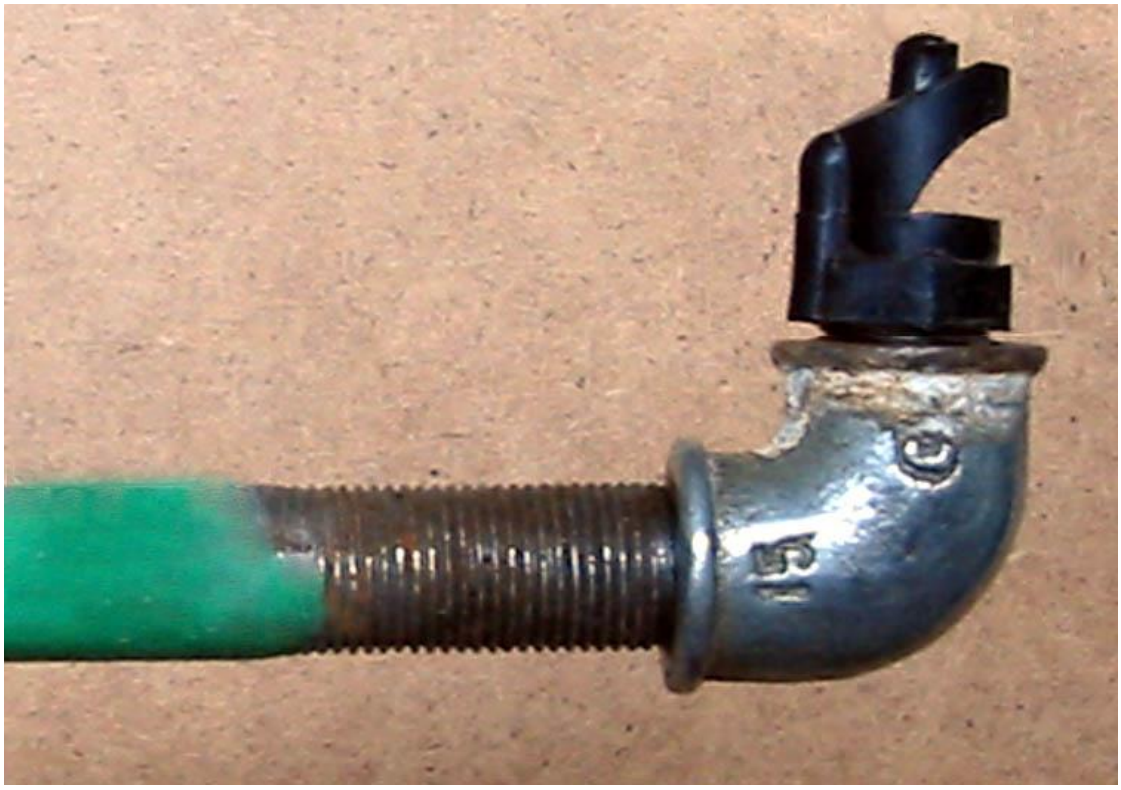


Рисунок 5.18 – Дефлекторная насадка секторного типа

Скорость ветра за время опыта и его направление в зоне полива измерялись анеморумбометром. Опыты проводились при скоростях ветра не более 0,5 м/с, давление принималось равным от 0,1 до 0,3 МПа, что соответствует условиям эксплуатации машины.

Опыты проводились в следующей последовательности. По показателям анеморумбометра отмечалась скорость ветра, проводился пробный полив, во время которого с помощью регулятора устанавливали необходимое давление. Затем на предполагаемой площади полива расставляют дождемеры.

Включаем в работу установку, начинается отсчет средней скорости ветра, и в течение 20 минут поливается площадка с дождемерами. Во время опыта ведется постоянный контроль за давлением в трубопроводе и при необходимости производится его корректировка.

За время опыта дважды измерялась скорость ветра, так как анеморумбометр М-63 считает ее за 10 минут. Одной из сложностей проведения эксперимента было то, что при некоторых повторностях измеренные таким образом скорости ветра отличались в 1,2–1,5 раза. Это связано с быстрым нарас-

танием скорости ветра в утренние и снижением в вечерние часы, поэтому основная часть опытов проводилась в тихую погоду (рассвет и дневные часы).

По окончании времени опыта с помощью мензурки определяли по секторам объем осадков в каждом дождемере с точностью до 0,1 мл.

В проведении опытов участвовали 3…4 человека.

По результатам опытов вычислялись значения функции плотности вероятностей величин $\rho$, $\alpha$ и интенсивности в точках установки дождемеров. Вычисление функций $f(\alpha)$ и $f(\rho)$ выполнялось с учетом зависимости (2.1) и пересчетом объемов в дождемерах к одинаковому углу $\Delta\alpha$ в интервале $\Delta\alpha = \frac{\pi}{6}$ при вычислении $f(\alpha)$.

Характеристики зоны дождевания $f(\alpha)$ и $f(\rho)$ на основании формулы (2.1) находим следующим образом.

Дождемеры, расположенные по радиусу, дают возможность вычислить $I = \frac{V_i}{S_d \cdot t}$. Подставив $I$ в (2.1), получим

$$f(\rho_i) = \frac{V_i \cdot \rho_i}{S_d \cdot t \cdot Q \cdot f(\alpha)} = \frac{V_i \cdot \rho_i}{C}, \qquad (5.2)$$

где $и$ – постоянная, определяемая по условию нормированности функции $f(\rho)$, т.е. по условию $\sum f(\rho_i)\Delta\rho = 1$.

Функцию $f(\alpha)$ по результатам эксперимента можно определить пересчетом объемов $V_i$ на одинаковый угол $\Delta\alpha$. Пусть с первым дождемером касаются радиусы, проведенные под углом $\Delta\alpha$ друг к другу. Тогда

$$\Delta\alpha \cdot \rho_1 = d,$$

где $d$ – диаметр дождемера, мм.

Если бы все дождемеры улавливали осадки с угла $\Delta\alpha$, то диаметры дождемеров следовало бы увеличивать до величины $d_i = \Delta\alpha \cdot \rho_i$.

Объем осадков в каждом дождемере нужно привести к углу $\Delta\alpha$ и интервалу $\Delta\rho = 0{,}5$м, т.е. получить

$$V_i^{'} = V_i \cdot \frac{\Delta\rho}{d} \cdot \frac{\Delta\alpha_1}{\Delta\alpha_i} = V_i \cdot \frac{\rho_i}{\rho_1} \cdot \frac{\Delta\rho}{d}. \qquad (5.3)$$

Сумма всех $V_i^{'}$ на данном радиусе, деленная на объем воды, вылитой на всю площадь орошения, дает вероятность попадания осадков в угол $\Delta\alpha$, а отношение вероятности к $\Delta\alpha$ – оценку функции $f(\alpha)$.

Общий объем осадков на площади орошения определяется суммой $\sum_{n=1}^{12}\sum_{i=1}^{20} V_{in}^{'} \cdot \frac{\pi}{6\Delta\alpha_1}$, тогда

$$f(\alpha_i) = \frac{\sum_{i=1}^{20} V_{in}\rho_i}{\frac{\pi}{6}\sum_{n=1}^{12}\sum_{i=1}^{20} V_{in}\rho_i}. \qquad (5.4)$$

### 5.5.3. Программа опытов

Программой опытов предусмотрено их проведение в два этапа.

Предварительные опыты проводили для проверки исходных допущений. При этом определяли вид аппроксимирующего закона распределения для случайных величин $\rho$ и $\alpha$.

Второй этап проводился для получения уравнений регрессии числовых характеристик дальности полета по радиусу $m_\rho$ и $\sigma_\rho$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_\alpha$ от рабочего давления, высоты установки и выходного отверстия насадки, т.е. зависимостей:

$$m_\rho = f_2(P,H,d);\ \sigma_\rho = f_3(P,H,d);\ \sigma_\alpha = f_4(P,H,d).$$

Опыты проводились по плану Бокса-Бенкина второго порядка [80, 82] при трех факторах. План включает три полных факторных эксперимента $2^2$, проводимых на трех уровнях третьего фактора и нулевые точки (таблица 5.1).

Кодирование переменных выполнено по известной методике. Нулевые уровни и интервал изменения переменных выбран с учетом технических характеристик дождевальной машины «Кубань-М», а по диаметру насадок – с учетом наличия насадок.

Таблица 5.1 – План экспериментов по некомпозиционному плану второго порядка

| Номер опыта | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | Примечания |
|---|---|---|---|---|
| 1 | + | + | 0 | |
| 2 | + | – | 0 | |
| 3 | – | + | 0 | |
| 4 | – | – | 0 | |
| 5 | 0 | 0 | 0 | |
| 6 | + | 0 | + | |
| 7 | + | 0 | – | |
| 8 | – | 0 | + | |
| 9 | – | 0 | – | |
| 10 | 0 | 0 | 0 | |
| 11 | 0 | + | + | |
| 12 | 0 | + | – | |
| 13 | 0 | – | + | |
| 14 | 0 | – | – | |
| 15 | 0 | 0 | 0 | |

Таблица 5.2 – Кодирование переменных

| Фактор | Обозначения | | Значения факторов на уровнях | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | размерные | кодированные | нижний | нулевой | верхний |
| Давление, Па | P | $X_1$ | 0,1 | 0,2 | 0,3 |
| Высота, м | H | $X_2$ | 1,6 | 2,2 | 2,8 |
| Диаметр, мм | D | $X_3$ | 3 | 5 | 7 |

### 5.5.4. Обработка результатов экспериментов

*ı tatsəj tɛʢʘcɖʃʃtslsȷ ʟʳ ts taʘʃɲʃtɛȷ нȷ dɟ dɛʃɖʃ fɲʃdzuʠʘʢdz ⁼ əȷ dɛʃuɖʃdz*

Понятие случайной величины – одно из основных в теории вероятностей. Случайная величина является числовой характеристикой результата эксперимента, т.е. числовой функцией [83, 84].

Говорят, что закон распределения случайной величины $\varkappa$ задан, если для любого множества действительных чисел $R$ задана вероятность $t\{\omega:\varkappa(\omega)\in R\}$ события, состоящего в том, что $X(\omega)$ примет значение из этого множества.

Часто необходимо знать закон распределения случайной величины. Если закон распределения неизвестен, но имеются основания предположить, что он имеет определенный вид (назовем его А), выдвигают гипотезу: случайная величина распределена по закону А, т.е. в этой гипотезе идет речь о виде предполагаемого распределения.

Возможен случай, когда закон распределения известен, а его параметры неизвестны, тогда в этой гипотезе идет речь о предполагаемой величине параметра одного известного распределения. Возможны и другие гипотезы: о равенстве параметров двух или нескольких распределений и многие другие.

Нулевой (основной) называют выдвинутую гипотезу $l_0$.

Конкурирующей (альтернативной) называют гипотезу $l_1$, которая противоречит основной.

На основе статистических данных очень трудно, а иногда и невозможно делать безошибочные выводы.

Ошибки при проверке гипотез могут быть двух родов. Ошибка первого рода состоит в том, что отвергается основная гипотеза, когда она на самом деле верна. Ошибка второго рода состоит в том, что отвергается конкурирующая гипотеза, когда она верна.

Для проверки нулевой гипотезы используют специально подобранную случайную величину, точное или приближенное распределение которой известно [83, 84]. Эту величину обозначают через $U$ или $Z$, если она распределена нормально, $F$ или $\nu^2$ – по закону Фишера-Снедекора, $\sigma$ – по закону Стьюдента, $\chi^2$ – по закону «хи-квадрат» и т.д.

Статистическим критерием называют случайную величину $\varsigma$, которая служит для проверки нулевой гипотезы.

Наблюдаемым значением $\varsigma_{набл}$ называют значение критерия, вычисленное по выборкам.

Критерием согласия называют критерий проверки гипотезы о предполагаемом законе неизвестного распределения.

Имеется несколько критериев согласия: $\chi^2$, $\varsigma$, Пирсона, Колмогорова, Смирнова и др.

Хотя критерии для проверки гипотез очень разнообразны, их объединяет общность логической схемы. В общих чертах эта схема сводится к пяти шагам [83].

**1-й шаг.** Исходя из содержательных соображений формулируют основную гипотезу $l_0$.

**2-й шаг.** Задаются величиной уровня значимости критерия $\alpha$, т.е. вероятностью отвергнуть основную гипотезу $l_0$, когда она верна. Этот уровень, как правило, выбирается следующим образом. Если гипотеза очень правдоподобна и нужны веские аргументы, чтобы её отвергнуть, то уровень значимости выбирают очень малым, например, 0,05, 0,01 или даже 0,005 и меньше. При наличии столь же правдоподобной альтернативы $l_1$ уровень значимости следует выбирать равным вероятности ошибки второго рода.

**3-й шаг.** Выбирают некоторую функцию – статистику $\varsigma$ от результатов (будущих) наблюдений $м_1, м_2, \acute{е}, м_n$ – и при обеих гипотезах (основной и конкурирующей) находят законы ее распределения $F_\varsigma(\Xi)$. Это самый сложный этап с математической (теоретической) точки зрения.

**4-й шаг.** С помощью закона распределения $F$ на основе выбранного уровня значимости (шаг 2) область возможных значений статистики разбивают на две или три части с помощью квантилей или процентных точек распределения $F_\varsigma$ (на две части – при односторонней альтернативе, на три – при двусторонней). В последнем случае должны быть области неправдоподобно малых уклонений статистики и области неправдоподобно больших значений статистики $\varsigma$.

**5-й шаг.** Делают выборку $м = (м_1, м_2, \acute{е}, м_n)$ и по ее результатам вычисляют статистику $\varsigma$ (шаг 3). Выясняют, в какую из областей попадает значение $\varsigma$. Если величина $\varsigma$ находится в области, где правдоподобна гипотеза $l_0$, то считают, что эксперимент не противоречит основной гипотезе $l_0$, т.е. она принимается.

Статистические проверки гипотез выполняют во многих случаях неоднократно, поэтому нужно знать, как часто делаются те или иные ошибки, а частота ошибок непосредственно связана с вероятностью. $l_0$ даже при однократной проверке гипотезы на основе статистических данных важно найти такой способ, чтобы вероятности ошибок были не только малыми, но и наименьшими из всех возможных.

Расчет коэффициентов уравнения регрессии выполняли в матричной форме:

$$B = \left(X^T X\right)^{-1}\left(X^T Y\right), \qquad (5.5)$$

где $X$ – матрица плана эксперимента;

$Y$ – вектор результатов опытов.

В системе Mathcad имеются программы транспонирования, обращения, перемножения матриц, поэтому для вычисления коэффициентов линейного уравнения регрессии достаточно создать матрицы плана эксперимента, результатов наблюдения, набрать формулу (5.5), набрать *B*=. По последней команде выполняется счет и вывод коэффициентов в виде вектора.

Матрица дисперсий-ковариаций $\left(X^T X\right)^{-1}$ позволяет вывести значения дисперсий коэффициентов уравнения регрессии и их ковариации. Если матрица плана эксперимента ортогональна, то все ковариации равны нулю и коэффициенты уравнения определяются независимо друг от друга.

Если матрицу плана дополнить столбцами произведений факторов и квадратичными членами, то соотношение (5.5) пригодно для вычисления всех коэффициентов. Следует иметь в виду, что матрица дисперсий-ковариаций при этом не является диагональной. Коэффициенты при квадратичных членах коррелированы со свободным членом. Если какие-то коэффициенты оказались незначимыми, то в матрице плана надо исключить столбцы этих факторов и, если они коррелированы со свободным членом, пересчитать коэффициенты уравнения регрессии по новому плану.

### 5.5.5. Порядок вычисления коэффициентов уравнения регрессии

Создать матрицу *мр* плана трехфакторного эксперимента с включением в нее фиктивной переменной $м^{<0>}$, принимающей значения +1 во всех опытах.

1. Создать матрицу *мd* взаимодействий и квадратов факторов.

2. Объединить матрицы *мр* и *мd* в матрицу *X* с помощью стандартной команды *Ωigement(мр,мd)*.

3. Создать вектор *Y1* значений функции отклика по заданному варианту.

4. Набрать формулу расчета коэффициентов уравнения регрессии в векторной форме. Вывести результаты счета коэффициентов.

5. Набрать формулы расчета дисперсии адекватности, вывести результат счета.

6. В реальных исследованиях *Dy* вычисляется по значениям *Y1* в повторностях. Вычислить критерий Фишера, оценить адекватность уравнения. Табличное значение критерия Фишера находим по приложению В при числе степеней свободы *k1* = 15–10=5 и *k2* = 45–15 = 30 и уровне значимости 0,05. Значение равно 2,534.

7. Выполнить графический анализ совпадения расчетных и опытных значений функции отклика в каждом опыте.

8. Набрать формулу расчета дисперсий-ковариаций *Dk*. Вывести матрицу дисперсий-ковариаций.

9. Набрать формулу расчета ошибок коэффициентов, вывести вектор ошибок *Ob*.

10. Сравнить численные значения коэффициентов с их ошибками.

11. При ∫ *b* > ⅃ коэффициент считать незначимым.

12. Если незначимые коэффициенты коррелированны с оставшимися, что видно по матрице *Dk*, необходим пересчет оставшихся коэффициентов. Коэффициент не коррелирован, если в строке и в столбце с его номером в матрице *Dk* стоят нули во всех клетках, кроме диагональной.

13. Для пересчета создать матрицу ʍfŋ состоящую из факторов со значимыми коэффициентами.

14. Выполнить расчет коэффициентов ⅃fŋ Сравнить их с результатами предыдущего счета.

15. Оценить значимость коэффициентов.

16. Выполнить графический анализ уравнения регрессии построением графиков функции отклика.

# 6. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

## 6.1. Распределение воды секторными насадками по радиусам зоны дождевания

Задачами данного исследования были проверка гипотезы о нормальном распределении дальностей и получение регрессионных зависимостей для описания распределения воды насадками по радиусам зоны дождевания. Зависимости необходимы для обоснования расположения насадок на трубопроводе методом математического моделирования [59, 60].

Переменными факторами при исследовании были приняты: давление воды перед насадкой, высота установки насадки над поверхностью поля, диаметр выходного отверстия насадки. Согласно программе исследований реализован не композиционный план второго порядка с варьированием переменных на трёх уровнях.

Дождемеры устанавливались через 0,5 м на радиусах, расположенных симметрично относительно середины зоны дождевания с шагом по углу $30^0$. По показаниям дождемеров вычисляли оценки функции плотности вероятностей радиусов и числовых характеристик: математического ожидания $m_\rho$ и среднего квадратического отклонения $\sigma_\rho$. Расчет оценок функции плотности вели по произведениям $V_i \cdot \rho_i$, согласно (5.2) и (5.3).

Значения функции плотности использованы для вычисления оценок математического ожидания и среднего квадратического отклонения радиуса.

Средние радиусы, вычисленные при различном отклонении от середины зоны дождевания, уменьшаются при смещении радиального ряда дождемеров к краям зоны дождевания. В последних радиальных рядах объем осадков малый, поэтому учет их наравне с другими рядами давал увеличение ошибки среднего значения. Так, если математическое ожидание $m_l$ вычислялось по каждому радиальному ряду, а затем результат усреднялся, то ошибка средней превышала 10%. Если $m_l$ вычислялось по объёму осадков в дождемерах, расположенных на окружностях, то результаты получались более усточивыми. Ошибка $m_l$, вычисленная по трем повторностям опытов, не превышала 2%, а распределения по радиусам мало отличались от нормального (рисунок 6.1). Нулевая гипотеза не отвергается при пятипроцентном уровне значимости, поэтому далее вычисляли числовые характеристики нормального распределения: математическое ожидание дальности – $m_l$ и среднее квадратическое отклонение $\mathring{u}_l$.

В полном квадратном уравнении для $m_\rho$ незначимыми оказались коэффициенты при $м_2$, при взаимодействиях $м_1 м_3$ и $м_2 м_3$ и при $м_1^2$, $м_2^2$, $м_3^2$.

После отбрасывания незначимых членов и пересчёта коэффициентов по способу наименьших квадратов получили адекватное уравнение

$$m_\rho = 3{,}4077 + 0{,}085028 \cdot X_1 + 0{,}634684 \cdot X_3 - 0{,}10431 \cdot X_1 \cdot X_2 . \quad (6.1)$$

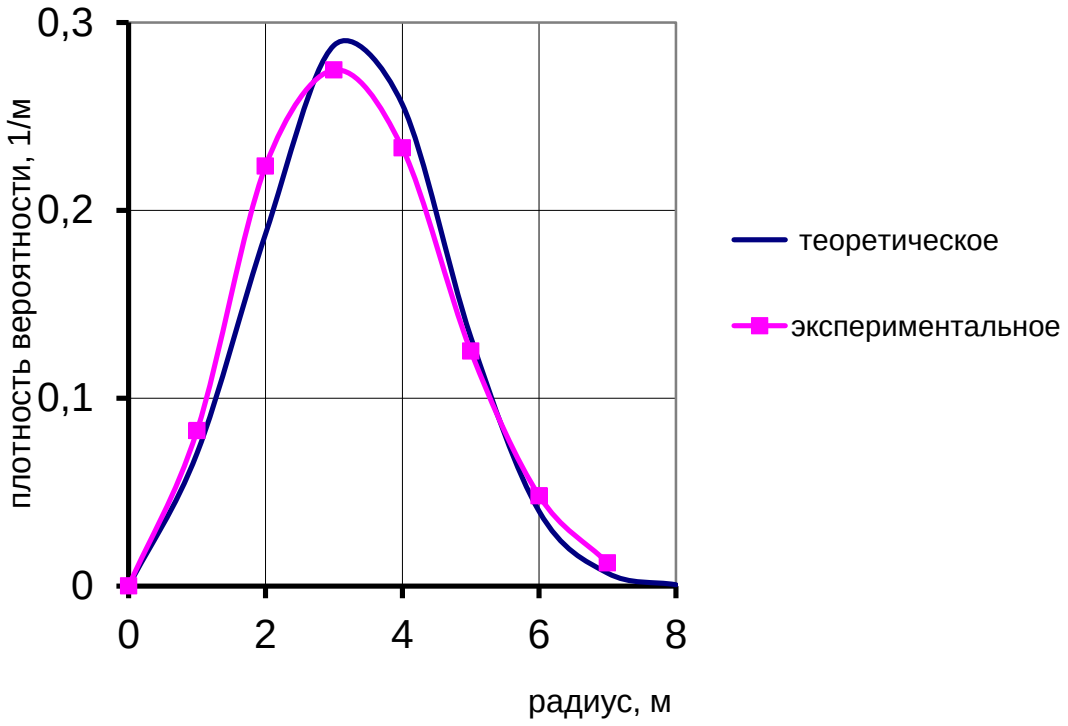



Рисунок 6.1 – Распределение воды по радиусам

Результаты опытов приведены в таблице 6.1.

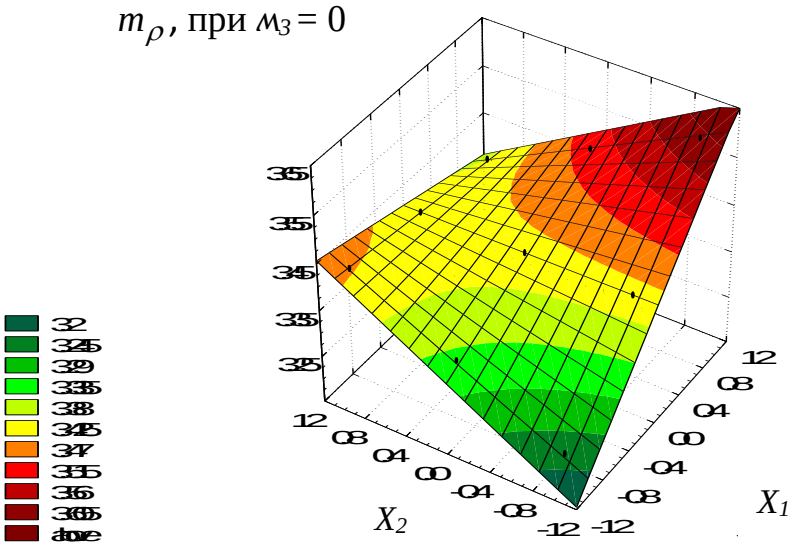
Таблица 6.1 – Результаты опытов по определению характеристик дальности полета капель

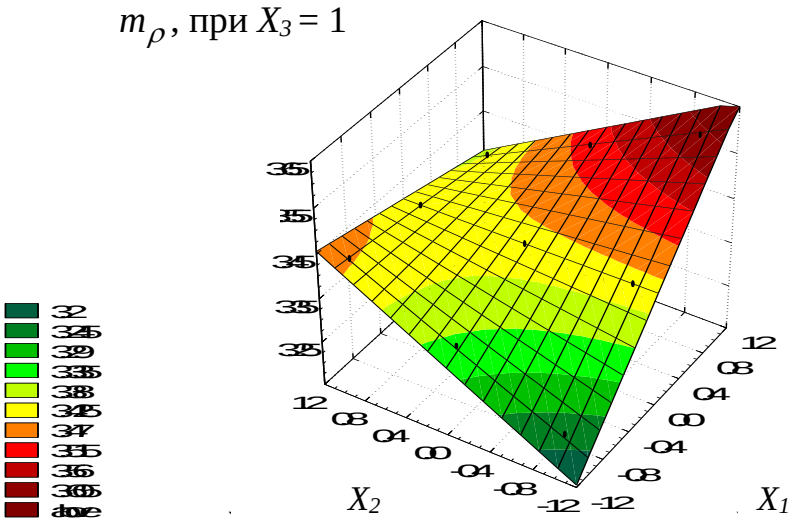
| Номер опыта | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $m_\rho$ | $\sigma_\rho$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | + | + | 0 | 3,48315 | 1,57093 |
| 2 | + | – | 0 | 3,60845 | 1,40109 |
| 3 | – | + | 0 | 3,36552 | 1,45021 |
| 4 | – | – | 0 | 3,07356 | 1,06679 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 3,35620 | 1,48650 |
| 6 | + | 0 | + | 4,20362 | 1,53092 |
| 7 | + | 0 | – | 2,58847 | 1,06938 |
| 8 | – | 0 | + | 4,02263 | 1,51190 |
| 9 | – | 0 | – | 2,74175 | 1,24079 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 3,43650 | 1,37793 |
| 11 | 0 | + | + | 4,01597 | 1,52732 |
| 12 | 0 | + | – | 3,03174 | 1,39686 |
| 13 | 0 | – | + | 4,01452 | 1,46967 |
| 14 | 0 | – | – | 2,81732 | 1,18210 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 3,35647 | 1,38186 |

Незначимость $м_2$ в линейном члене объясняется, видимо, малым интервалом варьирования фактора, однако он влияет во взаимодействии с $X_1$. Поверхность отклика (рисунок 6.2), из-за взаимодействия $м_1м_2$, приобретает винтообразность.

Уравнение (6.1) в натуральных переменных имеет вид:

$$m_\rho = 0{,}88626 + 4{,}67498 \cdot P + 0{,}317342 \cdot d - 0{,}3477 \cdot H - 1{,}7385 \cdot P \cdot H \,. \quad (6.2)$$



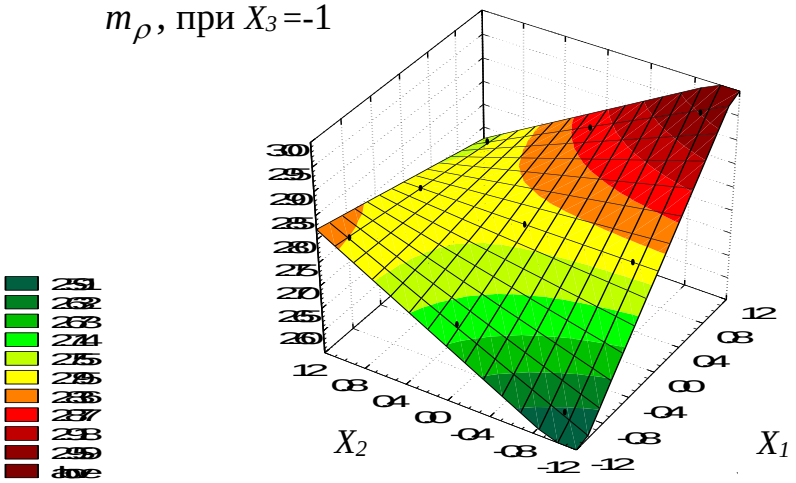
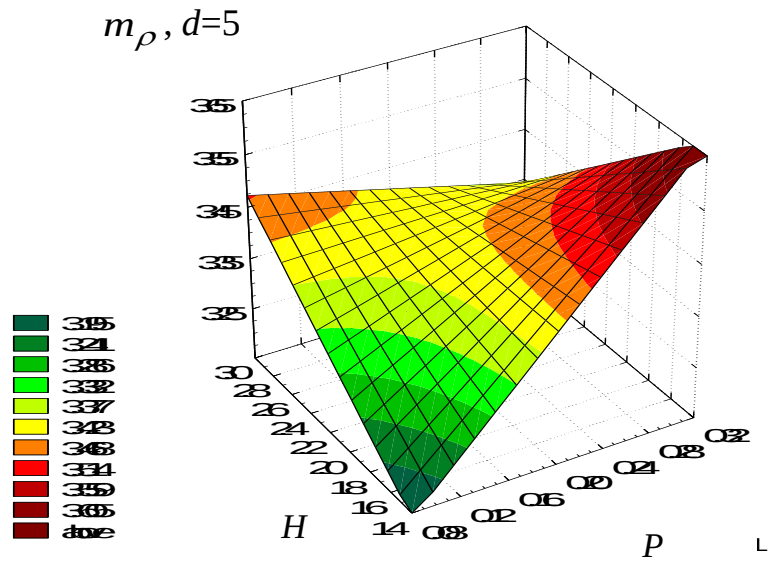
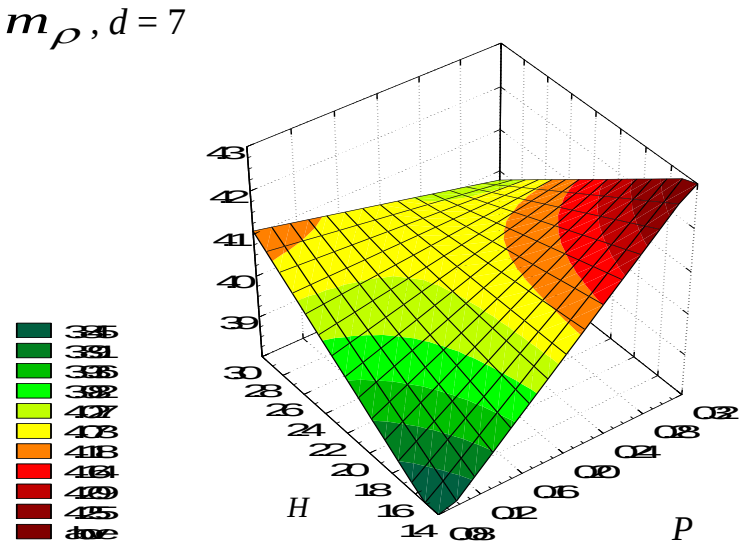




Рисунок 6.2 *Ѳ*– Анализ уравнений, характеризующих распределение воды по радиусам при кодированных переменных



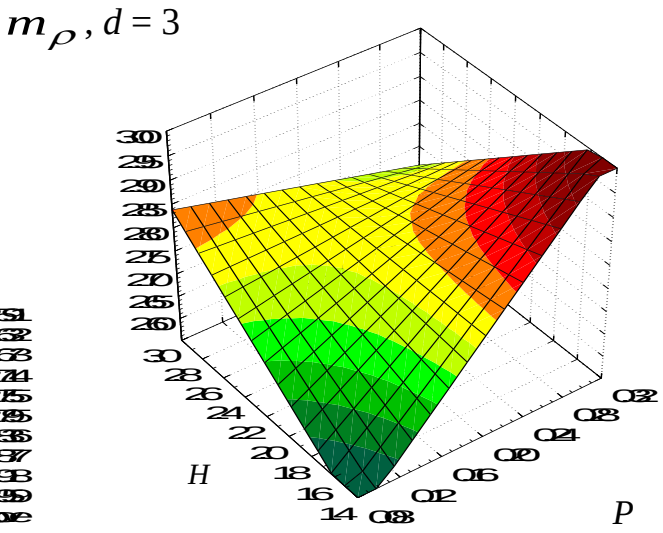




Рисунок 6.2 *в* – Анализ уравнения $m_\rho = f(P, H, d)$ в натуральных переменных

Математическое ожидание радиуса снижается, если м1 и м2 имеют одинаковый знак и повышается, если м1 и м2 находятся на противоположных уровнях. Наибольший прирост дальности получается при совместном увеличении м1 и м1Ам2, т.е. при отрицательном значении м2. Дальность $m_\rho$ растёт на 0,5 м при переходе м1 с нижнего на верхний уровень у всех насадок (рисунок 6.2 Ю). На верхнем уровне м2 эффекты м1 и м1Ам2 имеют противоположные знаки и при повышении м1 дальность $m_\rho$ снижается примерно на 0,1 м. Наибольшая дальность $m_\rho$ = 4,3 м получена на верхних уровнях м1 и м3 и на нижнем м2. Наименьшая дальность $m_\rho$=1,75 м получена на нижнем уровне м3, т.е. при *d*=3 мм и верхних уровнях м1 и м2.

При фиксировании значений м1 поверхность отклика становится плоской, которая при м1=0 параллельна оси м2. Изменение м от -1 до +1 приводит к незначительному повороту плоскости против часовой стрелки вокруг оси м3, если смотреть со стороны её положительного направления (рисунок 6.3).

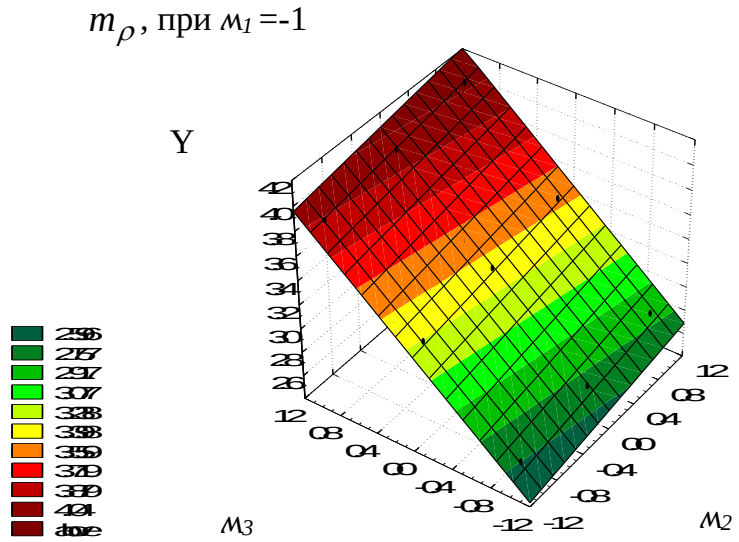



Рисунок 6.3 – Анализ уравненения, характеризующего распределение воды по радиусам

Разброс значений $\rho$ характеризуется средним квадратическим отклонением $\sigma_\rho$, значения которого приведены в таблице 6.1. Наибольшее значение $\sigma_\rho$ =1,57 м получено в первом опыте, где первые два фактора находятся на верхнем уровне. Наименьшее значение $\sigma_\rho$ получено в четырнадцатом опыте при нулевом уровне первого фактора и минимальных уровнях второго и третьего факторов.

Полное квадратное уравнение, полученное по результатам опытов, адекватно, но большинство его коэффициентов – незначимы.

После исключения незначимых и пересчета значимых коэффициентов получили адекватное уравнение с тремя коэффициентами:

$$\sigma_\rho = 1{,}377617 + 0{,}103211 \cdot X_2 + 0{,}13836 \cdot X_3 . \qquad (6.3)$$

В натуральных переменных уравнение (6.3) имеет вид:

$$\sigma_\rho = 0{,}6528726 + 0{,}17202 \cdot H + 0{,}06918 \cdot d\,. \qquad (6.4)$$

Уравнение имеет только линейные члены, и поверхность отклика является плоскостью (рисунок 6.4).

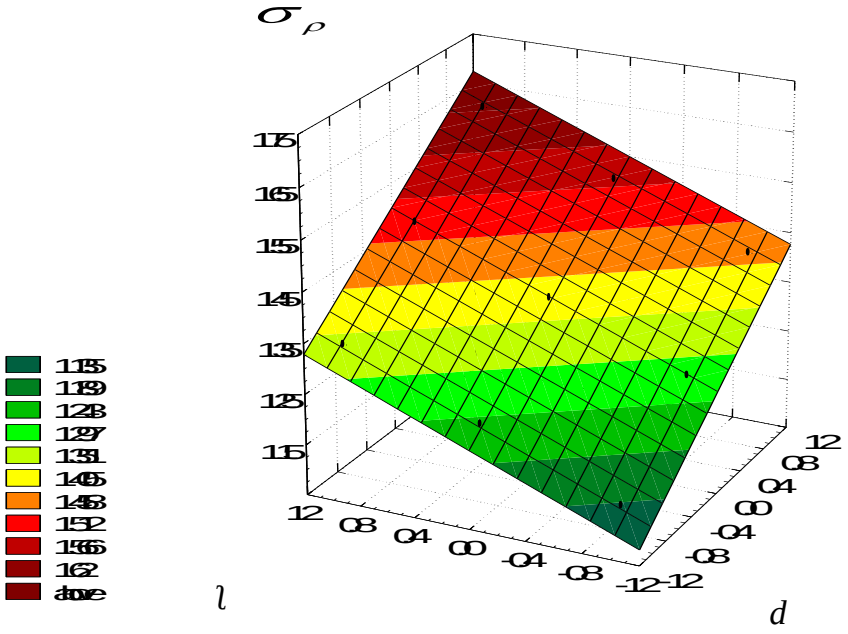



Рисунок 6.4 – Анализ уравнения для $\sigma_\rho$

На величину $\sigma_\rho$ не влияет давление либо интервал его изменения очень мал.

Влияние высоты $l$ и диаметра отверстия насадки – линейно. Поверхность отклика $\sigma_\rho$ имеет линию наибольшего ската по направлению диагонали плоскости $x_2Ax_3$. Наименьшее значение $\sigma_\rho$ получено при минимальных уровнях $x_2$ и $x_3$, т.е. при минимальной высоте установки насадки $l$ = 1,2 м и минимальном диаметре выходного отверстия $d$=3 мм.

Полученная зависимость функции плотности $f(\rho)$ входит в математические модели процесса дождевания. На основе моделей можно обосновать режимы работы и настройки дождевальной машины фронтального действия.

### 6.2. Распределение воды по секторам дефлекторными насадками дождевальных машин

С целью получения исходных данных о распределении воды по секторам для оптимизации процесса дождевания по критериям равномерности полива и энергосбережения был проведён трехфакторный эксперимент по некомпозиционному плану второго порядка с варьированием факторов на трех уровнях [59].

Переменными факторами согласно программе опытов (таблица 5.1) приняты давление $t$ перед насадкой, высота установки насадки $l$ и диаметр её выходного отверстия $d$.

Функциями отклика в опытах принимаем числовые характеристики нормального закона распределения воды по секторам.

Испытание насадок показало, что распределение воды по секторам близко к нормальному (рисунок 6.5).

Нулевая гипотеза не отвергается при пятипроцентном уровне значимости, поэтому для оценки распределения воды по секторам пользовались числовой характеристикой угла: средним квадратическим отклонением. У машин фронтального действия середина сектора дождевания должна быть ориентирована по линии движения, поэтому в опытах средний ряд совпадал с серединой сектора, а по результатам опыта вычисляли только среднее квадратическое отклонение $\sigma_\alpha$.

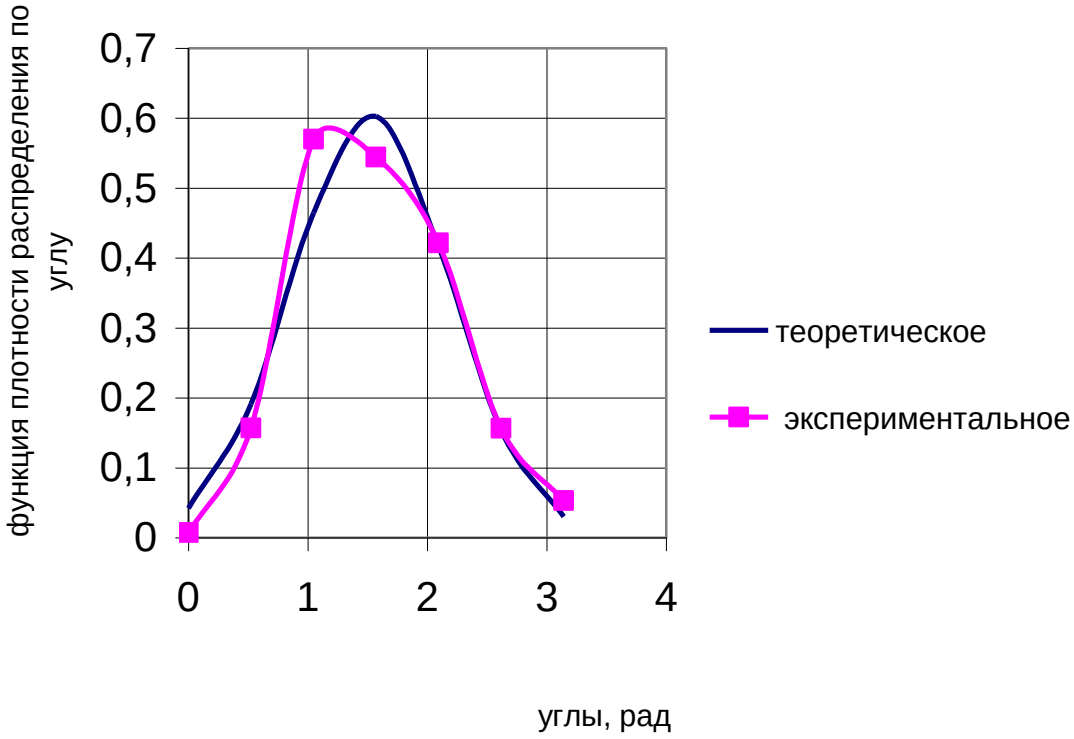



Рисунок 6.5 – Распределение воды по секторам

Результаты опытов приведены в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Результаты опытов по определению характеристик полета капель по секторам

| Номер опыта | $X_1$ | $X_2$ | $X_3$ | $\sigma_\alpha$ |
|---|---|---|---|---|
| 1 | + | + | 0 | 0,64416 |
| 2 | + | – | 0 | 0,69569 |
| 3 | – | + | 0 | 0,68710 |
| 4 | – | – | 0 | 0,65385 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0,69535 |
| 6 | + | 0 | + | 0,60593 |
| 7 | + | 0 | – | 0,67544 |
| 8 | – | 0 | + | 0,62215 |
| 9 | – | 0 | – | 0,51451 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0,65640 |
| 11 | 0 | + | + | 0,65168 |
| 12 | 0 | + | – | 0,57453 |
| 13 | 0 | – | + | 0,64212 |
| 14 | 0 | – | – | 0,59995 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0,66767 |

После завершения опытов выполнена проверка однородности выборки, рассчитаны коэффициенты в уравнении регрессии, выполнена оценка его адекватности, проведён регрессионный анализ коэффициентов.

В первоначальном полном квадратном уравнении незначимыми оказались коэффициенты при $м_2$, при взаимодействии $м_2$ и $м_3$, при $м_1^2 ď м_2^2$.

Влияние высоты $l$ на распределение воды по секторам при безветрии можно было отрицать на этапе выбора переменных факторов. Однако опыты проводились в естественных условиях, где полного безветрия не бывает. Фактор был оставлен ещё и потому, что его влияние на распределение по радиусам несомненно. Эффекты факторов $м_1$ и $м_3$ оказались значимыми и примерно в четыре раза больше, чем эффект $м_2$.

После исключения незначимых коэффициентов и пересчета оставшихся получено адекватное уравнение:

$$\sigma_\alpha = 0{,}66795 + 0{,}017264 \cdot X_1 + 0{,}01971 \cdot X_3 - 0{,}01982 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ - 0{,}04429 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0{,}05714 \cdot X_3^2, \qquad (6.5)$$

где $\sigma_\alpha$ – среднее квадратическое отклонение угла зоны дождевания в радианах.

Наибольшее влияние на величину $\sigma_\alpha$ оказывают фактор $м_3$, т.е. диаметр отверстия насадки, и взаимодействие $м_1 м_3$ (рисунок 6.6 *Ѳ*).

Кодированные значения переменных соответствуют таблице 5.2.

$$\sigma_\alpha = 0{,}128202 + 0{,}70926 \cdot P - 0{,}10595 \cdot P \cdot d + 0{,}16986 \cdot d - \\ - 0{,}014285 \cdot d^2. \qquad (6.6)$$

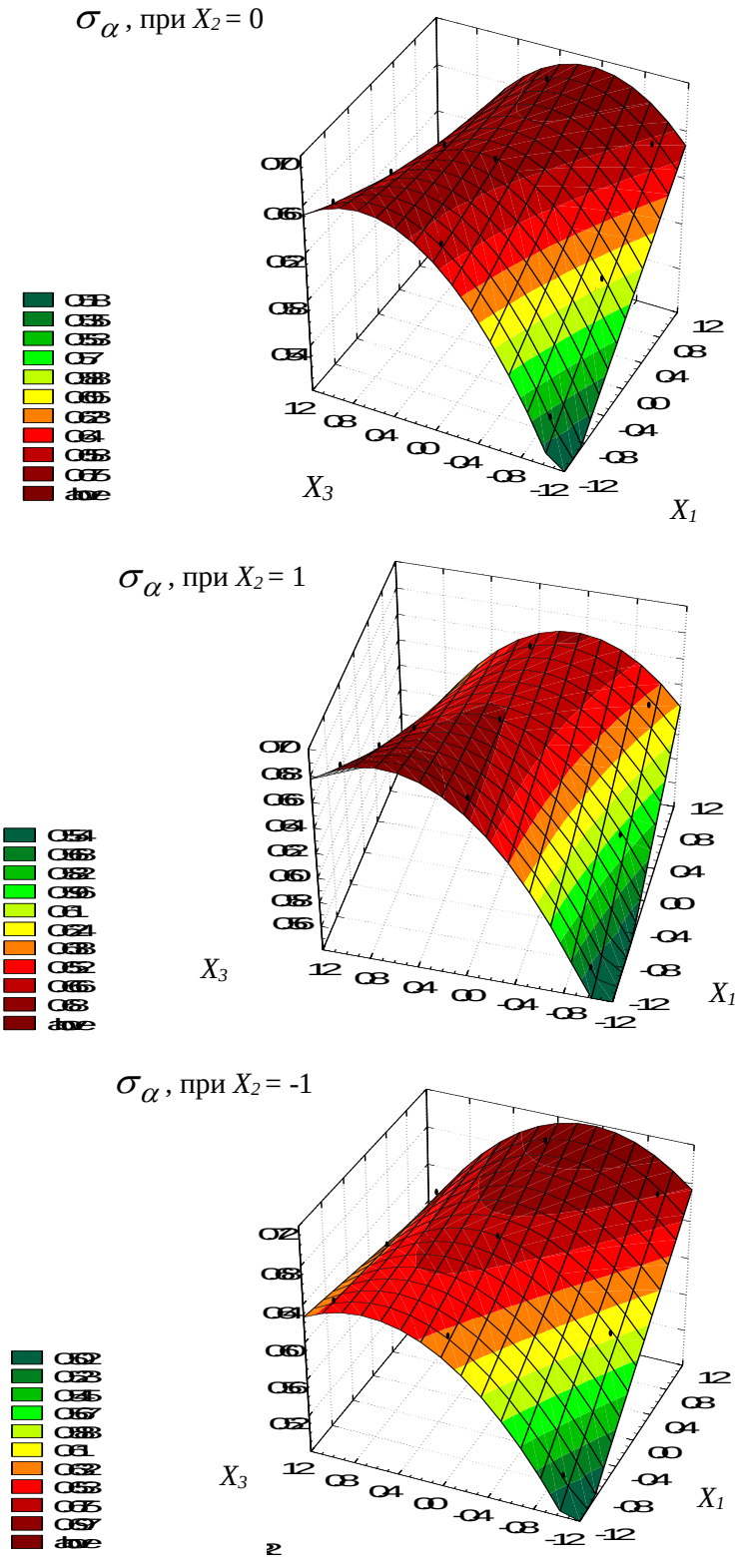



Рисунок 6.6 *О*– Поверхности функции отклика среднего квадратического отклонения угла зоны дождевания в кодированных переменных

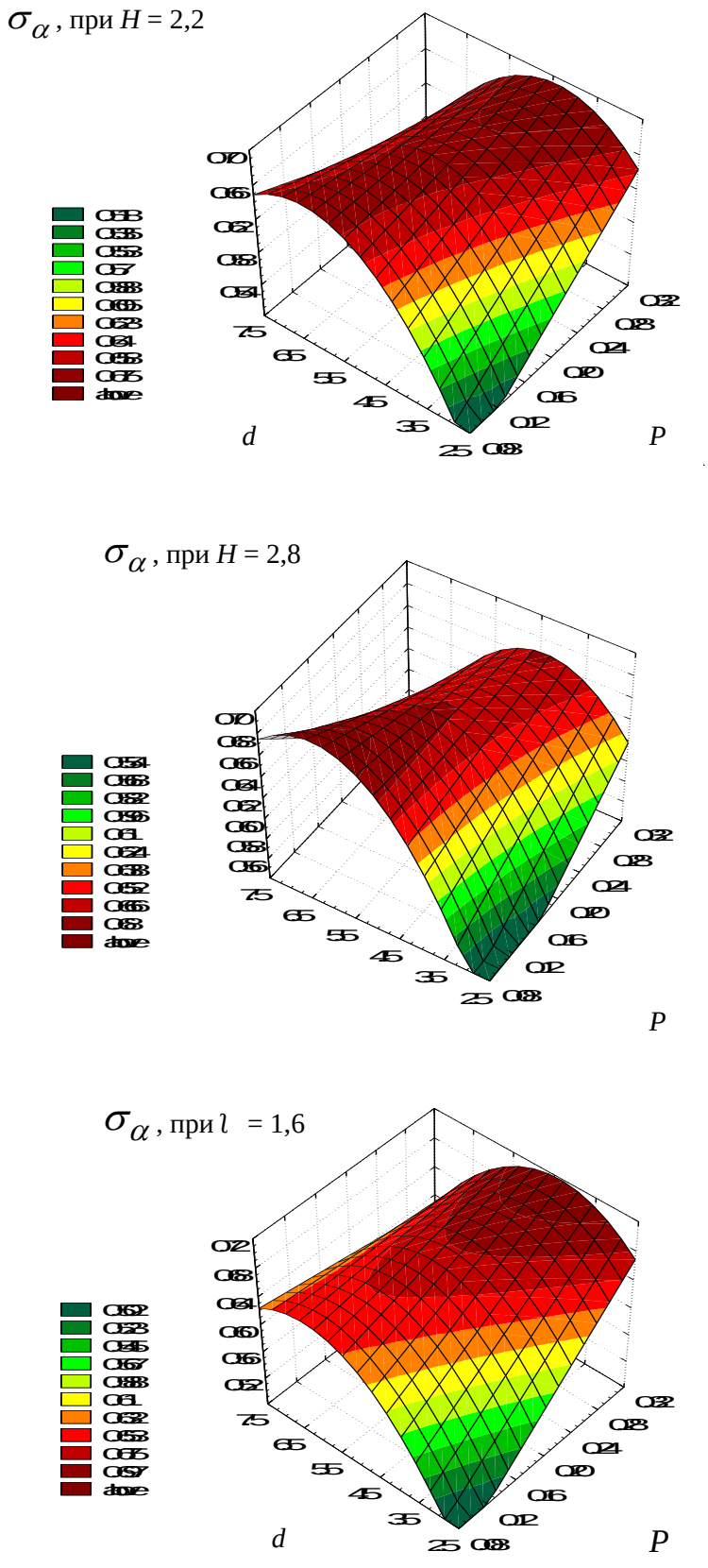



Рисунок 6.6 *в* – Поверхности функции отклика среднего квадратического отклонения угла зоны дождевания в натуральных переменных

Ранее показана необходимость получения значений $\sigma_\alpha$ = 0,7–0,8 рад. При таких значениях $\sigma_\alpha$ перекрытие зон орошения от смежных насадок даёт практически равномерное распределение воды по фронту после прохода машины. Условие равномерности достигается при минимальном числе насадок на трубопроводе.

Область $\sigma_\alpha \geq 0{,}7$ при $м_2$ = -1 (рисунок 6.6 *Θ*) довольно мала и расположена вблизи верхнего уровня $м_1$ и среднего $м_3$. Более надёжно такие значения $\sigma_\alpha$ получаются при нижнем и нулевом уровнях $м_2$. При $м_2$ = +1 область $\sigma_\alpha > 0{,}7$ практически отсутствует. Это приводит к заключению, что не все насадки дают достаточный угол зоны дождевания. Наиболее целесообразным способом регулирования норм дождевания с этих позиций является регулирование скорости фронтального перемещения машины.

Регулирование расхода воды путем изменения рабочего давления или диаметра насадок при неизменности их расположения на трубопроводе приводит к изменению размеров зон дождевания, ухудшению их перекрытия и нарушению равномерности полива.

Наиболее экономное расходование воды можно получить путём оптимизации расстояния между насадками, их диаметра и рабочего давления методом моделирования. Для расширения интервала изменения норм полива можно рекомендовать несколько вариантов установки насадок на трубопроводе.

### 6.3. Оптимизация размещения насадок на трубопроводе

В соответствии с алгоритмом оптимизации выполнены расчеты перекрытия зон дождевания для получения минимальной неравномерности [59]. Расчеты выполнены по некомпозиционному плану второго порядка при трех факторах $t$ , $l$ , $d$ (таблица 6.1). Исходными данными для расчетов были экспериментальные данные $m_\rho, \sigma_\rho$ и $\sigma_\alpha$ (таблицы 6.1 и 6.2). Для оценки адекватности уравнения регрессии вычисления $J_{tsf'ls}$ проведены для всех повторностей и для средних значений $m_\rho, \sigma_\rho$ и $\sigma_\alpha$. Всего просчитано шестьдесят вариантов распределений. В каждом варианте найдено оптимальное значение по неравномерности распределения перекрытий. Неравномерность при оптимальном перекрытии обычно не превышала 12% (рисунок 6.6).

Исходные данные, принятые для расчетов коэффициентов уравнения регрессии, приведены в таблице 6.3. Значения $m_\rho, \sigma_\rho, \sigma_\alpha$ и $J_{tsf'ls}$ взяты средними по трем повторностям. Аналогичные таблицы получены по каждой повторности. Они использованы при оценке адекватности уравнения регрессии.

По результатам моделирования получено уравнение регрессии:

$$\begin{aligned} l_{опт} &= 7{,}1492 - 0{,}08249 \cdot X_1 + 0{,}5298 \cdot X_2 + 0{,}7749 \cdot X_3 - \\ &- 0{,}0521 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0{,}24998 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0{,}2500 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0{,}2485 \cdot X_1^2 - \\ &- 0{,}2485 \cdot X_2^2 - 0{,}4985 \cdot X_3^2. \end{aligned} \quad (6.7)$$

В раскодированном виде уравнение (6.7) имеет вид:

$$\begin{aligned} l_{опт} &= 6{,}795 + 3{,}447 \cdot P + 4{,}615 \cdot H + 1{,}425 \cdot d - 0{,}868 \cdot P \cdot H - \\ &- 0{,}125 \cdot P \cdot d + +0{,}208 \cdot H \cdot d - 0.249 \cdot P^2 - 0{,}69 \cdot H^2 - 0{,}125 \cdot d^2. \end{aligned} \quad (6.8)$$

Уравнение адекватно при пятипроцентном уровне значимости, все коэффициенты значимы. Графики уравнения $l_{опт}$ (рисунок 6.7 *б*) в переменных, кодированных по зависимостям

$$(x_1 = \frac{t - 0{,}2}{0{,}1}; x_2 = \frac{l - 2{,}2}{0{,}6}; x_3 = \frac{d - 5}{2}),$$

позволяет найти оптимальную установку насадок при любых сочетаниях $t$, $l$, и $d$. В натуральных переменных графики приведены на рисунок 6.7 *в*.

Таблица 6.3 – Оптимальное расстояние между насадками

| Номер варианта | Исходные данные | | | Оптимальное расстояние $l_{опт}$ |
|---|---|---|---|---|
| | $m_\rho$ | $\sigma_\rho$ | $\sigma_\alpha$ | |
| 1 | 3,48315 | 1,57093 | 0,64417 | 7,29730 |
| 2 | 3,60845 | 1,40109 | 0,69569 | 6,09200 |
| 3 | 3,36552 | 1,45021 | 0,68710 | 7,31660 |
| 4 | 3,07356 | 1,06679 | 0,65385 | 5,90270 |
| 5 | 3,35620 | 1,48650 | 0,65930 | 7,90190 |
| 6 | 4,20362 | 1,53092 | 0,60593 | 6,71960 |
| 7 | 2,58847 | 1,06938 | 0,67544 | 5,66980 |
| 8 | 4,02263 | 1,51190 | 0,62215 | 7,63450 |
| 9 | 2,74175 | 1,24079 | 0,51451 | 5,58480 |
| 10 | 3,43650 | 1,37793 | 0,65640 | 6,78590 |
| 11 | 4,01597 | 1,52732 | 0,65168 | 7,83190 |
| 12 | 3,03174 | 1,39686 | 0,57453 | 5,78210 |
| 13 | 4,01452 | 1,46967 | 0,64242 | 6,52220 |
| 14 | 2,81732 | 1,18210 | 0,59995 | 5,47250 |
| 15 | 3,35647 | 1,38186 | 0,66767 | 6,75990 |

Увеличение диаметра $d$ во всех случаях приводит к увеличению $l_{опт}$ на 1,2 м и более. В то же время изменение давления с нижнего уровня на верхний не всегда связано с увеличением $l_{опт}$. При малой высоте $l$ = 1,6 м

и $d$ = 3 увеличение хорошо заметно (1,2 м), а при $d$ = 7 незначительный рост наблюдается до давления 2…2,2 МПа.

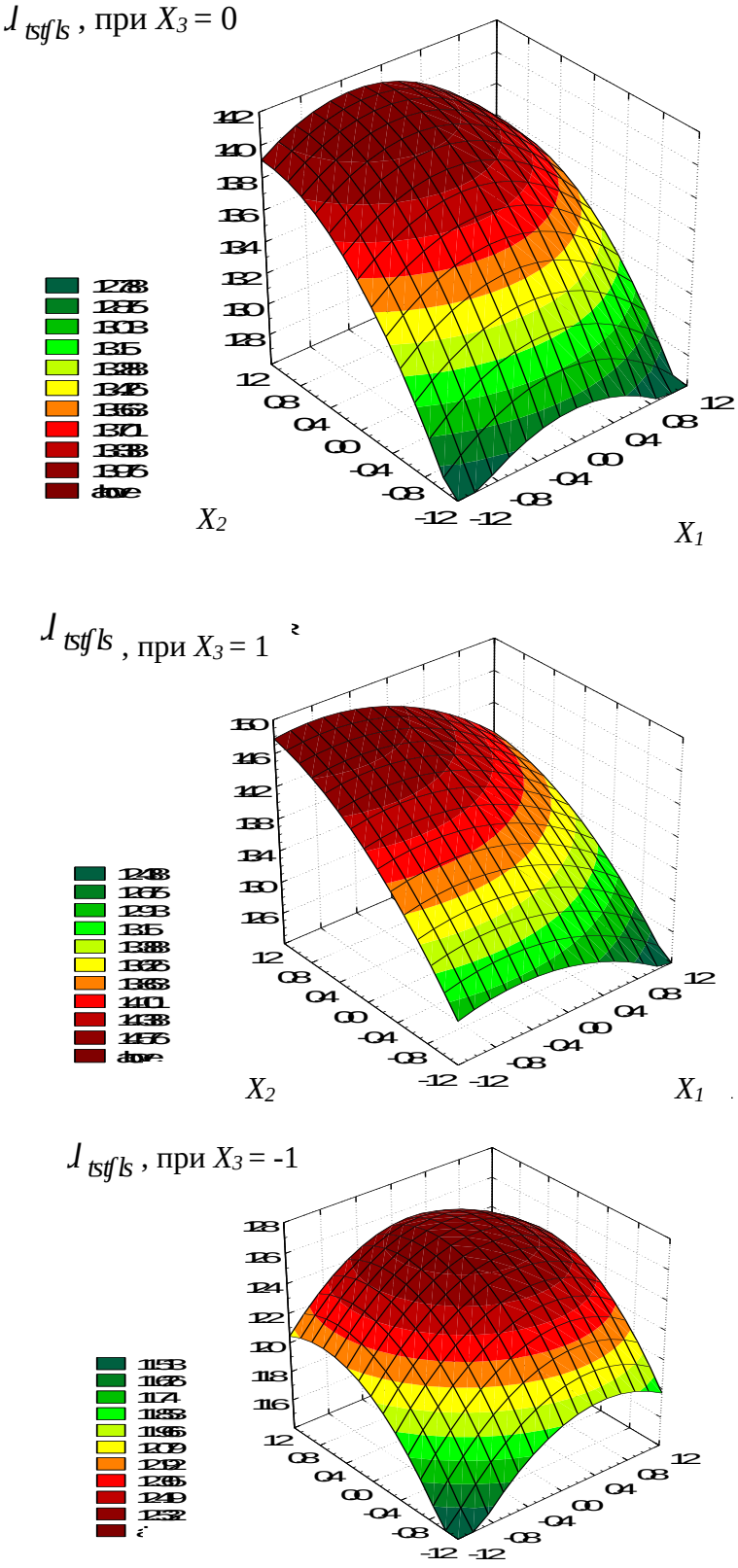
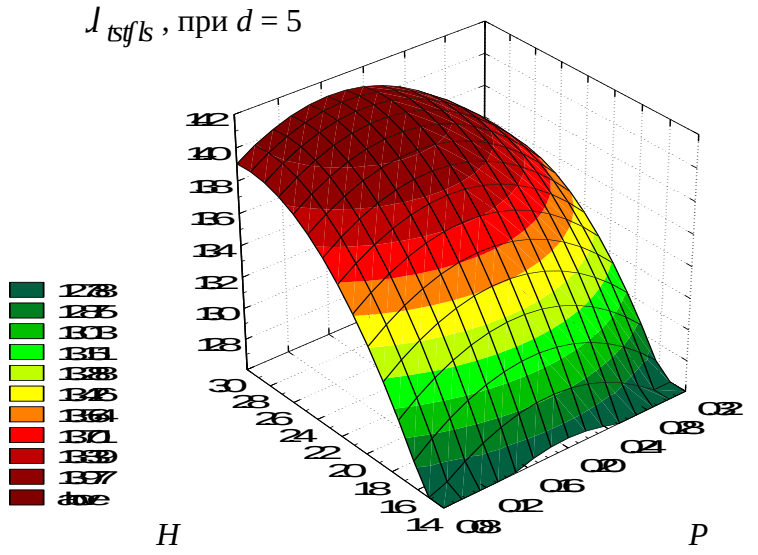
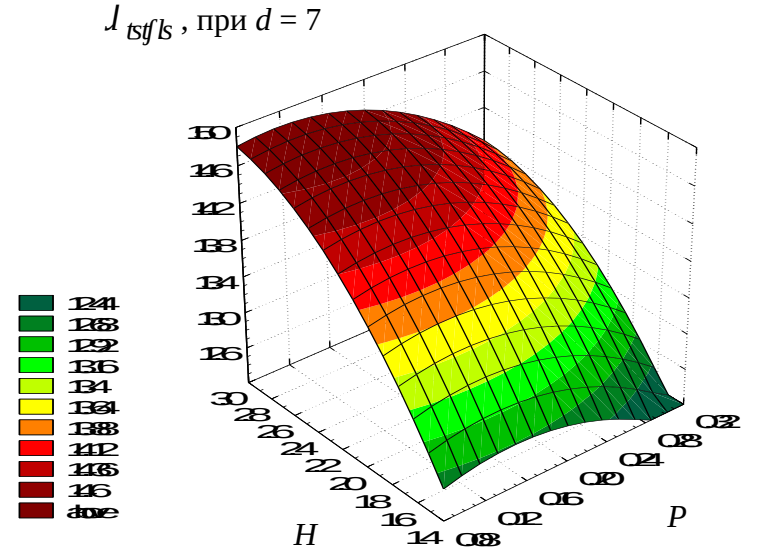



Рисунок 6.7 *О*– Оптимальное расстояние между насадками по условию минимума неравномерности в кодированных переменных



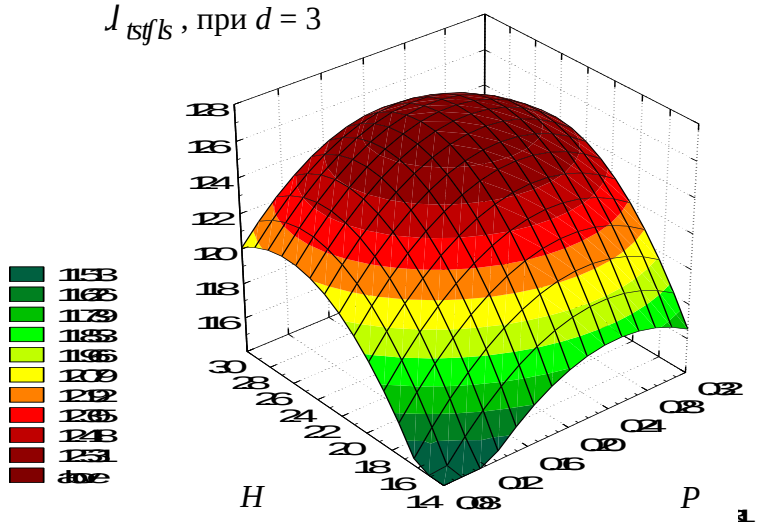




Рисунок 6.7 *в* – Оптимальное расстояние между насадками
по условию минимума неравномерности в натуральных переменных

При большой высоте $l$ = 2,8 м еще заметнее снижение $J_{tstf ls}$ при росте давления. Это объясняется также и рисунком 6.2 *в*. При $l$ = 1,4…1,6 м заметно значительное увеличение $m_\rho$, а при $l$ = 3 м наблюдается его падение.

По рисунку 6.7 $\Theta$ максимальное значение $J_{tstf ls}$ получено для насадки $d$ = 3 мм при $m_1$ = 0,8, $m_2$ = 0,4; для $d$ = 5 мм при $m_1$ =0, $m_2$ =1,2; для $d$ = 7 мм при $m_1$ = -0,4, $m_2$ =1,2.

Результаты исследования уравнения регрессии приведены в таблице 6.4.

Таблица 6.4 – Максимальные значения $J_{tstf ls}$ и их координаты

| При $d$, мм | Максимум $J_{tstf ls}$ | Координаты максимума | |
|---|---|---|---|
| | | $t$ | $l$ |
| 3 | 12,612 | 0,22 | 2,3 |
| 5 | 14,124 | 0,17 | 2,8 |
| 7 | 14,876 | 0,12 | 3,2 |

Координаты максимума найдены решением системы уравнения

$$\begin{cases} \dfrac{\partial J}{\partial t} = 0 \\ \dfrac{\partial J}{\partial l} = 0 \end{cases}$$

при $d$ = 3, 5, и 7 мм. Значение максимального $J_{tstf ls}$ – подстановкой координат в уравнение регрессии.

### 6.4. Выводы

1. Распределение воды секторной насадкой по радиусам зоны дождевания близко к закону Гаусса. Нулевая гипотеза не отвергается при пятипроцентном уровне значимости.

2. Математическое ожидание дальности полета капель зависит линейно от давления $t$ и диаметра $d$ выходного отверстия насадки и взаимодействия $t\,l$ по уравнению (6.2).

3. Зависимость среднего квадратического отклонения дальностей полета капель адекватно описана уравнением (6.4) плоскости в координатах высоты $l$ установки насадки $d$ ее выходного отверстия.

4. Распределение воды по секторам зоны дождевания у секторной насадки аппроксимируется законом Гаусса. Нулевая гипотеза не отвергается при пятипроцентном уровне значимости.

5. Зависимость среднего квадратического отклонения угла зоны дождевания от давления, высоты и диаметра отверстия адекватно описана полиномом второго порядка (6.6) с шестью коэффициентами, из которых один сво-

бодный член, два при $м_1$ и $м_3$, два при взаимодействиях $м_1 м_2$ и $м_1 м_3$ и один при $м_3^2$.

6. Максимальное значение среднего квадратического отклонения $\sigma_\alpha$=0,7 рад, полученное в опытах, меньше теоретически оптимального $\sigma_{\alpha tsif ls}$=0,8 рад, поэтому желательна модернизация насадок для увеличения зоны дождевания в направлении, параллельном трубопроводу.

7. Результаты экспериментальных исследований использованы при оптимизации методом моделирования расстояния между насадками на трубопроводе по критерию равномерности орошения.

8. По условию равномерности распределения воды оптимальное расстояние между насадками на трубопроводе адекватно определяется полным квадратным уравнением регрессии (6.7), в котором 10 коэффициентов при трех независимых переменных $t$ , $l$ , $d$.

9. Равномерность дождевания машинами фронтального движения предлагается оценивать коэффициентом вариации доз орошения, определяемых после прохода машины, или математического моделирования движения, на линиях, параллельных трубопроводу. Критерий учитывает реальный результат действия машины, более требователен к большим отклонениям от заданной дозы, унифицирован с показателями, применяемыми в других распределительных системах, и выполняется на стандартных компьютерных программах.

10. Максимальные значения $L_{\max}$ оптимального расстояния между насадками $d$ = 3 мм, равное 12,612 м, получено при $t$ = 0,22 МПа и $l$ = 2,3 м, между насадками $d$ = 5 мм $L_{\max}$= 14,124 м получено при $t$ = 0,17 МПа и $l$ = 2,8 м, между насадками $d$ = 7 мм $L_{\max}$ = 14,876 м получено при $t$ = 0,12 МПа и $l$ = 3,2 м.

# 7. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ДОЖДЕВАНИЯ МАШИНОЙ НЕПРЕРЫВНОГО ФРОНТАЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Одним из направлений снижения энергоемкости дождевания является применение на дождевальных машинах низконапорных насадок и дождевальных аппаратов.

Разработанные в Ставропольском НИИГиМ дождевальные насадки секторного действия работают при пониженном давлении. Их применение на машине позволяет снизить энергоемкость примерно в два раза.

Пьезометрическая линия трубопровода дождевальной машины имеет нисходящий характер, поэтому насадки работают при различном рабочем давлении. Если, с целью снижения энергоемкости не применять дроссели для выравнивания давления перед насадками, то равномерности дождевания по длине трубопровода можно достигнуть за счет изменения расстояния между насадками, их диаметра или высоты установки.

## 7.1. Расчет размещения насадок

Задача оптимизации формулируется так [59, 62, 66]. На основе математических моделей и экспериментальных данных о функциях распределения осадков по углу зоны дождевания и по ее радиусам $f(\alpha)$ и $f(\rho)$ рассчитать оптимальные расстояния между насадками на трубопроводе при различных значениях давления, диаметра выходного отверстия насадки и высоты ее установки. Результаты расчетов представить в виде уравнения. Используя пьезометрическую линию, уравнение регрессии для оптимального по равномерности дождевания расстояния между насадками $l_{ст} = f(P,H,d)$ и расходные характеристики насадок, решить задачу оптимального размещения насадок на трубопроводе. При этом необходимо выполнить условия соблюдения заданной дозы полива на всей длине трубопровода и работы насоса дождевальной машины с полной производительностью при максимальном КПД. Последние условия диктуются требованиями максимальной производительности и энергосбережения. Задача оптимизации может иметь не одно решение, поэтому требуется просчет нескольких вариантов или последовательных приближений и выбор лучшего из них.

Исходными данными для расчета служат:

- общая длина трубопровода – *B*, м;
- уравнения или графики расходных характеристик насадок $Q = f_1(P,d)$;
- уравнение регрессии параметров зоны дождевания, зависящее от давления, высоты и диаметра насадок:

$$m_\rho = f_2(P,H,d),\ \sigma_\rho = f_3(P,H,d),\ \sigma_\alpha = f_4(P,H,d);$$

$$m_\rho = 0{,}88626 + 4{,}67498 \cdot P + 0{,}3477 \cdot H - 1{,}7385 \cdot P \cdot H; \qquad (7.1)$$

- математическая модель процесса дождевания;

- норма полива $W$, м$^3$/га или $N=W/10$ мм;
- предельная интенсивность дождя, $[I]$, мм/мин;
- характеристика насоса при модернизации машины или каталог характеристик при проектировании новой машины.

$$\sigma_\rho = 0{,}6528726 + 0{,}17202 \cdot H + 0{,}06918 \cdot d; \quad (7.2)$$

$$\sigma_\alpha = 0{,}128202 + 0{,}70926 \cdot P \cdot d + 0{,}16986 \cdot d - 0.013883 \cdot d \cdot H - \\ - 0{,}014285 \cdot d^2. \quad (7.3)$$

При проектировании новой машины определяем расход $Q_{dz}$ и давление $t_{dz}$, которые должен давать насос. Допустимую интенсивность дождевания $[I]$: для стационарных систем: 0,1…0,2 мм/мин – для тяжелых почв; 0,2…0,3 мм/мин – для суглинка; 0,5…0,8 мм/мин – для легких почв. Для машин, работающих в движении, допустимую интенсивность принимают примерно в 1,5 раза больше.

Проектный распределительный расход $q_{lp}$ − количество воды в литрах, выливаемой в единицу времени с одного метра трубопровода:

$$q_{lp} = \frac{Q_{dz}}{B}, \quad (7.4)$$

где $Q_{dz}$ – объемная подача воды насосом, л/с;

$B$ – длина трубопровода машины, м.

Размер зоны дождевания в направлении движения машины обозначим $Y_{ww}$.

Так как $I = \frac{60 \cdot q_{lp}}{Y_{ww}} \le [I]$, то $Q_{dz} \le \frac{[I] \cdot Y_{ww} \cdot J}{60}$, . (7.5)

Давление в трубопроводе в месте установки насадки, наиболее удаленной от насоса, принимают по технической характеристике насадки.

Потери давления в трубопроводе считают на основании гидравлического расчета [14, 62].

Давление, создаваемое насосом $t_{dz}$, находят как сумму статического и динамического давлений:

$$P_н = \frac{\rho \cdot Q^2}{2 \cdot F_{stc}^2}, \quad (7.6)$$

где $Q$ – расход воды через крыло трубопровода;

$F$ – площадь сечения трубопровода, м$^2$;

$J$ – плотность воды, кг/м$^3$.

По $t_{dz}$ и $Q_{dz} = 2 \cdot Q$ выбирают насос. Рабочая точка должна находиться в зоне максимального КПД.

При модернизации машины пониженное давление при неизменном расходе можно получить путем замены насоса. Далее вычисляют $q_{lp} = \frac{Q_{dz}}{J}$ и выбирают скорости движения по заданным нормам полива.

Норма полива $N$, л/м$^2$ или слой дождя в миллиметрах

$$N = \frac{q_{lp}}{V_{dз}}, \tag{7.7}$$

откуда

$$V_{dз} = \frac{q_{lp}}{N}. \tag{7.8}$$

Если задан диапазон норм полива, то вычисляют диапазон скоростей. Если скорость $V_{dз}$ не соответствует технической характеристике машины, то изменяют число проходов $m$ машины для получения заданной нормы полива и приемлемой скорости.

$$V_{dз} = \frac{Q_{dz} \cdot m}{B \cdot N}. \tag{7.9}$$

Постоянство дозы полива обеспечивается изменением расстояния между насадками и увеличением диаметра насадки на конце трубопровода.

Расходные характеристики насадок в виде формул $Q_d = f(P,d)$ получаем по результатам опытов или по литературным источникам [14, 61].

Зависимость $J_{tsfls} = \Phi(P,H,d)$ получили моделированием распределения воды каждой насадкой и перекрытием зон дождевания. Моделируя перекрытие, находили расстояние $J_{tsfls}$ между насадками, при котором неравномерность распределения воды в направлении оси $м$ после прохода машины минимальна (рисунок 7.1)

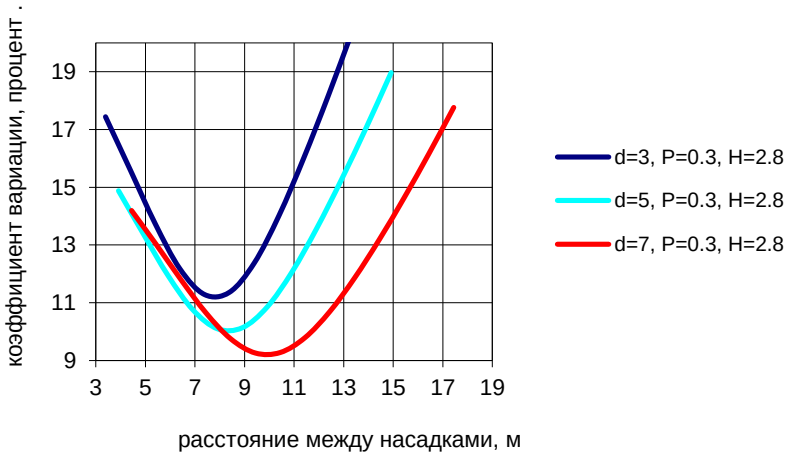



Рисунок 7.1 – Влияние расстояния между насадками на коэффициент вариации дозы полива

Вычислительный эксперимент строили по некомпозиционному плану второго порядка при трех факторах: давление $t$, высота установки $l$ и диаметр выходного отверстия насадки $d$. План включает пятнадцать вариантов расчета. В каждом варианте найдены $J_{tsfls}$ при соответствующих $\sigma_\alpha, \sigma_\rho, m_\rho$ и получили уравнение регрессии $J_{tsfls} = \Phi(t, l, d)$.

Исходными данными для моделирования распределений были экспериментальные данные $m_\rho, \sigma_\rho$ и $\sigma_\alpha$, по которым получены формулы (7.1, 7.2, 7.3). Моделирование выполнено по вероятностным математическим моделям [14, 81]. Для оценки адекватности уравнения регрессии вычисления $y_{ср}$ проведены для всех повторностей и для средних значений $m_\rho, \sigma_\rho$ и $\sigma_\alpha$. В каждом варианте найдено оптимальное по равномерности распределения перекрытие. Неравномерность при оптимальном перекрытии обычно не превышала 12%.

По результатам моделирования получено уравнение регрессии:

$$y_{ср} = 7{,}1492 - 0{,}08249 \cdot X_1 + 0{,}5298 \cdot X_2 + 0{,}7749 \cdot X_3 - 0{,}0521 \cdot X_1 \cdot X_2 - \\ - 0{,}2498 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0{,}2500 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0{,}2485 \cdot X_1^2 - 0{,}2485 \cdot X_2^2 - 0{,}4985 \cdot X_3^2, \quad (7.10)$$

где $X_1 = \dfrac{h - 0{,}2}{0{,}1}$; $X_2 = \dfrac{l - 2{,}2}{0{,}6}$; $X_3 = \dfrac{d - 5}{2}$.

В раскодированном виде уравнение (7.10) имеет вид:

$$y_{ср} = 3{,}447 \cdot P + 4{,}615 \cdot H + 1{,}425 \cdot d - 0{,}868 \cdot P \cdot H - 0{,}125 \cdot P \cdot d + \\ + 0{,}208 \cdot H \cdot d - 0{,}249 \cdot P^2 - 0{,}69 \cdot H^2 - 0{,}125 \cdot d^2 - 6{,}795. \quad (7.11)$$

Уравнение адекватно при пятипроцентном уровне значимости, все коэффициенты значимы.

Максимальные значения $y_{ср}$ и их координаты приведены в таблице 6.4.

*и тf tsfmtsв r te·1dзj ћ j dx[w dx·fn·нtsС*

При статическом давлении в точке установки первой насадки рассчитываем величины

$$Q_d,\ B_{ср},\ B_{\min},\ B_{\max},\ q_{lo} = \frac{Q_d}{B_{ср}},\ q_{l\max} = \frac{Q_d}{B_{\min}},\ q_{l\min} = \frac{Q_d}{B_{\max}}$$ для всех

насадок, имеющихся в наборе. Отношения расхода насадки к расстояниям между ними дают диапазон распределенного расхода, который реализуется данной насадкой (рисунок 7.2).

Строят на одном листе графики функций $q_{l\rho}$, $q_{lf\min}$, $q_{lf\max}$. Отмечают на графике минимальное и максимальное давления в трубопроводе, то есть граничные значения диапазона рабочего давления, $h_{\min}$ и $h_{\max}$.

В пределах диапазона $h_{\min} - h_{\max}$ выполняются три условия эффективности процесса: получение высокой равномерности ($V < 5\%$), заданной дозы внесения и максимальной производительности машины. Если линия $q_{l\rho}$ проходит выше точки пересечения линий $q_{lf\min}$ и $q_{lf\max}$, то условия эффективности процесса нельзя выполнить – необходимо изменить скорость $V_д$ в сторону уменьшения или изменить диаметр отверстия насадки, так как уменьшение скорости ведет к снижению производительности машины и росту эксплуатационных затрат на единицу продукции.

Чем ближе линия проектного расхода к точке пересечения $q_{lf\,\min}$ и $q_{lf\,\max}$, тем труднее реализуются условия эффективности процесса на всей длине трубопровода.

Рабочие точки насадок должны располагаться на линии проектного расхода между точками его пересечения с линиями максимального и минимального распределенного расхода для данной насадки. Если это условие не выполняется, надо сменить насадку и построить графики $q_{lf\,\min}$ и $q_{lf\,\max}$ для другой насадки.

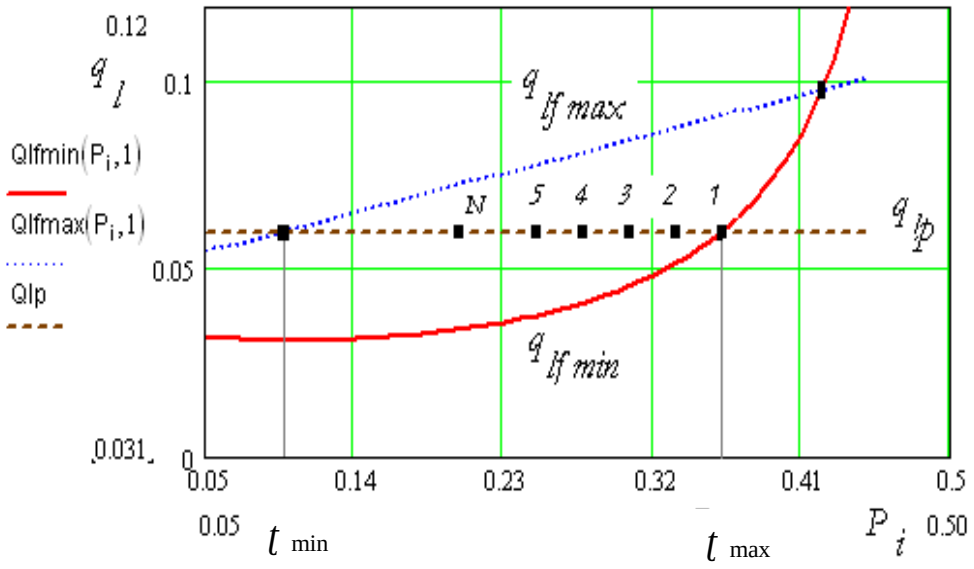



Рисунок 7.2 – Графики функций $q_{l\rho}, q_{lf\,\min}, q_{lf\,\max}$

Если $\frac{Q_d}{B_{\min}} \langle q_{lp}$, то насадки можно устанавливать с расстоянием в два раза меньшим от оптимального, но насадки располагают поочередно веером вперед и веером назад по движению машины. Это равноценно двухрядному расположению насадок со сдвигом рядов на половину расстояния. Таким образом, расстояние между насадками, направленными в одну сторону относительно направления движения, будет близким к оптимальному, а проектный расход для насадки $q_{l2}$ можно принять уменьшенным в два раза, то есть

$$q_{l2} = \frac{Q_{dk}}{2 \cdot J}, \tag{7.12}$$

и по этой величине подбираем первую насадку. Давление в трубопроводе постепенно уменьшается при удалении от насоса, поэтому расход насадки $Q_d$ уменьшается, и для получения проектного распределенного расхода $q_l$ по длине трубопровода расстояние между насадками необходимо уменьшать [59].

Первую насадку при однорядном размещении выбираем по условию

$$\frac{Q_d}{B_{\max}} \le q_{lp} \le \frac{Q_d}{B_{\min}}. \tag{7.13}$$

Если принять $B_1 = B_{\max}$, то один типоразмер насадки устанавливается на значительной части крыла, переходов на увеличенный диаметр будет меньше.

Если принять $B_1 = B_{tstfls}$, то будет обеспечена лучшая равномерность дождевания, но потребуется больше типоразмеров насадок.

Координата установки первой насадки $м_1 = 0{,}5 \cdot Л_1$. Координата второй насадки предварительно принимается

$$м_2^{'} = X_1 + B_1. \qquad (7.14)$$

В точке $X_2^{'}$ находим давление $P_2$ и определяем расход через насадку $Q_{d2}$. Далее находим ширину $B_{2q}$ по условию постоянства дозы, т.е.

$$B_{2q} = \frac{Q_{d2} \cdot n_p}{N_1 \cdot V_{dЗ}}, \qquad (7.15)$$

где $n_p$ – число рядов установки насадок и вычисляем $X_2 = X_1 + \frac{B_{2q}}{2}$ и $м_3^{'} = X_2 + B_{2q}$. Вычисляем давление $P_3$ в точке с координатой $X_3^{'}$ и расход через насадку при этом давлении $Q_{d3}$. Находим $B_{3q} = \frac{Q_{d3} \cdot n_p}{N_1 \cdot V_{dЗ}}$. Далее считаем $X_3 = X_2 + \frac{B_{3q}}{2}$, $м_4^{'} = X_3 + B_{3q}$ и т.д. до конца трубопровода.

Каждый раз проверяем условие $B_{iq} > B_{\min}$.

При переходе через граничное условие меняем диаметр насадки.

Возможно размещение насадок на трубопроводе с одинаковым расстоянием между ними близким к $Л_{tstfls}$. Постоянство дозы обеспечиваем дросселями перед насадками. Способ дает преимущества в изготовлении машины, но создает дополнительные сложности в эксплуатации и повышении энергоемкости. При правильной регулировке давлений перед насадками возможно равномерное распределение воды. Процедура расчета ограничена выбором насадки и уточнением скорости машины.

После выбора насадки по условию (7.10) уточняют расстояние между насадками $B_d$. Из условия равенства распределенных расходов $\frac{Q_{dz}}{B} = \frac{Q_d}{B_d}$ получим

$$B_d = \frac{Q_d \cdot B}{Q_{dz}}. \qquad (7.16)$$

Скорость машины определяют по заданной норме полива из уравнения (7.8).

Координаты установки насадок

$$X_i = B_d \cdot (0{,}5 + i),$$

где $i$ = 0,1,2é *(ş* -1*)*.

Число насадок на одном крыле трубопровода $K = \frac{0{,}5 \cdot B}{B_d}$.

Общий расход воды через трубопровод $Q_{ls\ tc} = Q_d \cdot K$.

Для двух крыльев вычисляют общий расход $Q = 2 \cdot Q_{ls\ tc}$ и сравнивают его с расходом, принятым при выборе насоса $Q_{dz}$. Небольшие отличия возникают только за счет округления при расчете.

### 7.2. Выводы

1. Результаты экспериментальных исследований использованы при оптимизации методом моделирования расстояния между насадками на трубопроводе по критерию равномерности орошения.

2. По условию равномерности распределения воды, оптимальное расстояние между насадками на трубопроводе адекватно определяется полным квадратным уравнением регрессии (7.11), в котором 10 коэффициентов при трех независимых переменных $t$ , $l$ , $d$.

3. Предложено размещение насадок на трубопроводе по условиям минимума неравномерности и энергоемкости и максимума КПД насоса.

# ЛИТЕРАТУРА

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 декабря 2014 года № 1421: «О внесении изменений в Государственную программу развития сельского хозяйства и регулировании рынка сельскохозяйственной продукции, сырья и продовольствия на 2013–2020 годы».

2. **МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ СТРУЙНЫМ АППАРАТОМ** *ʏ jtcdtsɔtsdtsɔ ɹ.ϕ., ɹ tsdʁOtgɔ ϕ.ϕ.* Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2000. № 7. С. 21.

3. Кравченко, Л.В. Анализ исследований по агротехнической оценке процесса дождевания // Научная молодежь – агропромышленному комплексу: сб. науч. тр. / АЧГАА. – Зерноград: АЧГАА, 2003.

4. Кравченко, Л.В. Совершенствование моделирования процессов дождевания / Л.В. Кравченко, А.М. Крупка // Технологии, техника засушливого земледелия: исследования, испытания, освоение в производстве: сб. науч. тр. / ВНИПТИМЭСХ. – Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 2003.

5. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 7749-1-2004. Оборудование сельскохозяйственное оросительное. Аппараты дождевальные вращающиеся, Ч. 1: Требования к конструкции и эксплуатационным характеристикам.

6. Исаев, А.П. Гидравлика дождевальных машин / А.П. Исаев. – Москва: Машиностроение, 1973. – 216 с.

7. Межгосударственный стандарт ГОСТ ИСО 7749-2-2004. Оборудование сельскохозяйственное оросительное. Аппараты дождевальные вращающиеся. Ч. 2: Равномерность орошения и методы испытаний.

8. Карпеко, А.Н., Сельскохозяйственные машины / А.Н. Карпеко, В.М. Халанский. – Москва: ВО «Агропромиздат», 1989.

9. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Г.Е. Листопад, Г.Л. Демидов, Б.Д. Зонов и др.; под общ. ред. Г.Е. Листопада. – Москва: Агропромиздат, 1986.

10. Кленин, Н.И. Сельскохозяйственные и мелиоративные машины / Н.И. Кленин, В.А. Скакун. – Москва: Колос, 1994.

11. Сандигурский, Д.М. Механизация поливных работ / Д.М. Сандигурский, Н.А. Безроднов. – Москва: Колос, 1975.

12. Евсеев, Г.А. Эксплуатация дождевальных машин / Г.А. Евсеев. – Москва: Россельхозиздат, 1987. – 208 с.

13. Новые конструкции дождевальных аппаратов / К.В. Губер, В.И. Канаров, Г.П. Лямперт и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 1999. – № 3.

14. Аппараты дождевальные среднеструйные «Роса-3»: паспорт Н087.03.200ПС. – Изготовитель ПО «Гатчинсельмаш». – Гатчина, 1990.

15. **THE UNIFORMITY OF IRRIGATION WITH SINGLE - JET AND MULTI - JET SPRINKLER APPARATUS OF RIE ACTION** *Chernovolov V.A., Kravchenko L.V.* В сборнике:Applied and Fundamental Studies Proceedings of the 7th International Academic Conference. Publishing House “Science and Innovation Center”. 2014. С. 199-211.

16. Лебедев, Б.М. Дождевальные машины / Б.М. Лебедев. – Москва:

Машиностроение, 1977.

17. Совершенствование широкозахватной дождевальной техники, методов ее проектирования и эксплуатации / Г.А. Ландес, В.Г. Луцкий, Ю.А. Москвичев и др. // Сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – 1974. – Т.V. – С. 322–373.

18. Лямперт, Г.П. Гидравлический расчет водовода широкозахватных дождевальных машин / Г.П. Лямперт // Новое в технике и технологии полива. – Москва, 1976. – С. 29.

19. Афанасьев, В.Н. Пути качественного развития и классификация многоопорных фронтальных дождевальных машин / В.Н. Афанасьев, В.Г. Луцкий, К.В. Губер // Сб. науч. тр. «Надежность и качество технологического процесса полива». – Москва: ВНИИГиМ, 1988. – С. 38.

20. Параметры дождевальной машины «Фрегат» увеличенной длины / Н.И. Рычков, Е.П. Олефир, С.П. Ильин и др. // Гидротехника и мелиорация. – 1974. – № 10. – С. 37.

21. Савушкин, С.С. Обеспечение оптимальных гидравлических характеристик низконапорной дождевальной машины «Фрегат» / С.С. Савушкин, И.А. Бобров, Т.М. Некрасов // Оптимизация технических средств и технологии полива. – Москва, 1985. – С. 61–65.

22. Рязанцев, А.И. Машина «Фрегат» для работы на пониженном напоре / А.И. Рязанцев, В.И. Евтюхин // Оптимизация технических средств и технологии полива. – Москва, 1985. – С. 40–47.

23. Результаты испытаний многоопорной дождевальной машины ДМ-100/65 «Фрегат» / С.Н. Никулин, А.Н. Корягин, Н.Г. Роньшин и др. // Труды / ВНИИМи ТП. – 1972. – Т. III. – С. 129–149.

24. Параметры дождевальной машины «Фрегат» увеличенной длины / Н.И. Рычков, Е.П. Олефир, С.П. Ильин и др. // Гидротехника и мелиорация. – 1974. – № 10. – С. 37–39.

25. Бредихин, Н.П. Эксплуатация ДМ «Фрегат» в Дагестанской АССР / Н.П. Бредихин, П.Д. Ким, А.И. Королев // Гидротехника и мелиорация. – 1975. – № 6.

26. Краковец, В.М. «Фрегат» – новая дождевальная установка / В.М. Краковец, Ю.А. Москвичев, А.М. Полонский и др. // Гидротехника и мелиорация. – 1971. – № 9. – С. 27–33.

27. Рязанцев, А.И. Конструктивно-технологические особенности электрифицированной машины кругового действия «Кубань-ЛК» / А.И. Рязанцев, В.И. Евтюхин // Ресурсосберегающие технологии и техника орошения. – Москва, 1987. – С. 68–76.

28. Носенко, В.Ф. Оценка гидравлических характеристик ДМ «Кубань» / В.Ф. Носенко, В.Г. Луцкий, С.С. Савушкин // Гидротехника и мелиорация. – 1982. – № 5.

29. Никулин, С.Н. Дождевальная машина «Кубань» / С.Н. Никулин, А.А. Смирнов // Гидротехника и мелиорация. – 1981. – № 7.

30. Гусейн-Заде, С.Х. ДДН и пути их дальнейшего усовершенствования / С.Х. Гусейн-Заде, Н.М. Рашидов // Сб. науч. тр. / АзНИИГиМ. – 1972. – № 9.

31. Губер, К.В. Требования, предъявляемые к дождевальной технике / К.В. Губер, М.Ю. Храбров // Тракторы и сельхозмашины. – 1998. – № 8.

32. Колесник, Ф.И. Агроэкономическая эффективность дождевальных машин / Ф.И. Колесник, Н.Ф. Соловьева // Техника в сельском хозяйстве. – 1989. – № 4.

33. Агроклиматический атлас Ростовской области. – Ростов-на-Дону: РГУ, 2000.

34. Спринжер, Д.С. Эрозия при воздействии капель жидкости / Д.С. Спринжер. – Москва: Машиностроение. – 1981.

35. Кружилин, И.П. Согласование элементов техники с условиями проведения полива / И.П. Кружилин, П.И. Кузнецов // Степные просторы. – 1981. – № 2. – С. 45–47.

36. Марквартде, В.М. Вопросы моделирования траекторий дождевальных струй // Труды УкрНИИСХОМ и ВИСХОМ. – 1969. – Вып. 6. – С. 239–249.

37. Оптимизация выбора дождевальных аппаратов с использованием ЭВМ / А.И. Козлов, Е.П. Олефир, А.А. Кристанов, В.В. Вишняков // Современные методы разработки и оценки технологий и технических средств полива. – Москва: ВНИИГиМ, 1986. – С. 16.

38. Козлов, А.И. Определение радиуса полива струйного дождевального аппарата / А.И. Козлов, М.В. Манасян // Современные методы разработки и оценки технологий и технологических средств полива. – Москва, 1986.

39. Новые широкозахватные дождевальные машины / Г.П. Лямперт, Р.С. Праздников, В.Д. Мурашов и др. // Тракторы и сельхозмашины. – 1989. – № 12.

40. Поспелов, А.М. Дождевание / А.М. Поспелов. – Москва, 1952. – С. 324.

41. Гаврилица, А.Г. Некоторые пути повышения качества дождя / А.Г. Гаврилица // Сельское хозяйство Молдавии. – 1977. – № 5. – С. 12–27.

42. Бредихин, Н.И. Разработка методов улучшения радиуса действия дальнеструйных дождевателей, обеспечивающих равномерное увлажнение орошаемой площади при ветре / Н.И. Бредихин // Сб. науч. тр. / ЮжГипроводхоз. – Ростов-на-Дону, 1972. – С. 150–160.

43. Бальбульонов, К.П. Влияние струенаправляющих элементов дальнеструйных машин на качество полива / К.П. Бальбульонов, Ш.И. Ильясов // Вести с.-х. науки Казахстана. – 1976. – № 1. – С. 48–56.

44. Гварамадзе, И.Д. Влияние ветра на распределение искусственного дождя / И.Д. Гварамадзе // Вопросы гидромелиорации Грузии. – 1980. – № 3. – С. 76–78.

45. Гусейн-Заде, С.Х. О выборе расстояний между дальнеструйными аппаратами на стационарных системах / С.Х. Гусейн-Заде // Сб. науч. тр. / АзНИИГиМ. – Баку. – 1966. – № 6.

46. Краснощеков, В.С. Влияние ветра на равномерность распределения осадков и увеличение урожая с.-х. культур / В.С. Краснощеков // Сб. науч. тр. / ВНИИМиТН. – 1976. – Вып. 9. – С. 5–18.

47. Вуколов, В.В. Разработка и выбор рабочих органов дождевальных машин для орошения при скорости ветра свыше 3 м/с: диссертация кандидата технических наук / В.В. Вуколов. – Москва, 1992.

48. Колесник, Ф.И. Методы оценки качественных показателей технологического процесса работ, выполняемых механизированными отрядами «Сельхозтехники» по мелиорации и химизации / Ф.И. Колесник, А.И. Трунов, Е.П. Шилова; Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований (ЦНИИТЭИ). – Москва, 1971. – 81 с.

49. Колесник, Ф.И. Результаты государственных испытаний дождевальных машин и методы оценки качества их работы / Ф.И. Колесник // Сб. науч. тр. / ВИСХОМ. – 1960. – Вып. 6. – С. 128–143.

50. Испытания дождевальных машин // Сб. науч. тр. / ВНИИГиМ. – Москва, 1959. – Т. XXXIV. – С. 47–65.

51. Колесник, Ф.И. Оценка качества искусственного дождя / Ф.И. Колесник // Гидротехника и мелиорация. – 1968. – № 2. – С. 22–31.

52. Нурриддинов, Т.Н. К вопросу повышения качества дождевания среднеструйными дождевальными аппаратами / Т.Н. Нурриддинов // Тракторы и сельхозмашины. – 1974. – № 9. – С. 30–31.

53. Гусейн-Заде, С.Х. К методике определения равномерности дождя при испытании дождевальных машин / С.Х. Гусейн-Заде, В.И. Коваленко // Тракторы и сельхозмашины. – 1965. – № 12. – С. 30–32.

54. Краснощеков, В.С. Критерии оценки равномерности полива при дождевании // Сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – 1975. – Т. VII. – С. 3–32.

55. Бредихин, Н.И. Дальнеструйные дождевальные машины / Н.И. Бредихин, Н.А. Ревенко // Механизация и электрификация с.х. – 1978. – № 7. – С. 41–48.

56. Лямперт, Г.П. Дождевание при ветре ДДН-70 при изменении угла наклона ствола аппарата / Г.П. Лямперт // Новое в технике и технологиях полива. – Москва, 1980.

57. Циприс, Д.Б. Классификация и сравнение критериев равномерности полива и задачи управления водным режимом поля / Д.Б. Циприс, С.М. Белинский // Водооборотные системы в мелиорации и пути повышения эффективности их действия. – Ленинград, 1979. – С. 96–108.

58. Циприс, Д.Б. Критерии равномерности полива и оптимальное расположение источника дождевальных струй / Д.Б. Циприс, С.М. Белинский // Прогрессивные способы орошения, включая машинное орошение. – Москва, 1975. – С. 83–102.

59. **МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ДОЖДЕВАНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР МАШИНАМИ ФРОНТАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ** ş taÖ›uj dÆts∫ .l . диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Зерноград, 2003

60. **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЖДЕВАНИЯ МАШИНАМИ ФРОНТАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ С СЕКТОРНЫМИ НАСАДКАМИ** ʏ j tədtsɔtsdtsɔ ɹ .ɸ., ʂ tɐƆɔuj dɬ̈ts ∫ .ɹ ., ∫ kƛ⁻Ɔdʁʃdƶ.ɹ .ɸ. Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. 2014. № 100. С. 670-680.

61. Черноволов, В.А. Расчет показателей эффективности дождевания на площади между четырьмя односопловыми аппаратами / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014662137 от 24.11.2014.

62. Черноволов, В.А. Оптимизация расстояния между насадками дождевальных машин фронтального действия / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко // Свидетельство о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2014617785 от 04.08.2014.

63. Черноволов, В.А. Расчет показателей эффективности дождевания одноструйными аппаратами при работе на двенадцати позициях / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко, О.В. Буткова // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015616299 от 5.06.2015.

64. Черноволов, В.А. Распределение воды по секторам дефлекторными насадками дождевальных машин / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко // Разработка технического оснащения производства продукции животноводства. – Зерноград: ВНИПТИМЭСХ, 2003.

65. **МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДОЖДЕВАНИЯ ДАЛЬНЕСТРУЙНЫМИ АППАРАТАМИ ПРИ РАБОТЕ ПО КРУГУ** ʏ j tədtsɔtsdtsɔ ɹ .ɸ., ʂ tɐƆɔuj dɬ̈ts ∫ .ɹ . Вестник АПК Ставрополья. 2014. № 3 (15). С. 68-72.

66. Черноволов, В.А. Оптимизация размещения стационарных дождевателей методом математического моделирования / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко // Материалы международной научно-практической конференции «Техническое и кадровое обеспечение инновационных технологий в сельском хозяйстве» 23–24 октября 2014 г.; НИИ МЭСХ БГАТУ. – Минск, 2014. – С. 114–116.

67. Бондарев, А.А. Моделирование и оптимизация процесса дождевания сельскохозяйственных культур среднеструйными аппаратами для улучшения равномерности полива: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / А.А. Бондарев. – Зерноград, 1999.

68. Черноволов, В.А., Бондарев А.А. Обоснование параметров ветроустойчивого дождевального аппарата / В.А. Черноволов, А.А. Бондарев; Азово-Черноморская агроинженерная академия. – Зерноград, 1998. Рукопись деп. в ВИНИТИ 1999, № 729 В 99.

69. Christiansen, J.E., Irrigation by Sprinkling, Bulletin 670, University of California, Berkeley, 1942 (Христиансен, Орошение спринклерами, бюллетень 670, Калифорнийский университет, Беркли, 1942).

70. Колесник, Ф.И. Мелиоративные основы повышения эффективности дождевальных машин / Ф.И. Колесник // Гидротехника и мелиорация. – 1979. – № 10.

71. **МЕТОДИКА ОПТИМИЗАЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЖИДКОСТИ.**

ʏ j tɑdtsɔtsdtsɔ ɹ.ϕ., ʂ tɑƠɔuj dɫ̈tsʃ ..ɹ., ʂ tɑdzfʃʕƠϕ.ʃ . Тракторы и сельхозмашины. 2004. № 1. С. 8.

72. Черноволов, В.А. Оптимизация процесса дождевания сельскохозяйственных культур машинами непрерывного фронтального перемещения / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко, А.М. Крупка // Известия высших учебных заведений, Северо-Кавказский регион. Приложение № 1. – 2004.

73. Бондарев, А.А. Влияние ветра на распределение осадков среднеструйным дождевальным аппаратом / А.А. Бондарев // Совершенствование технологических процессов, машин и аппаратов в инженерной сфере АПК: материалы конференции. – Зерноград: АЧГАА, 1999.

74. Макаров, Е.Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15. Учебный курс / Е.Г. Макаров. – Санкт-Петербург: Питер, 2011. – 400 с.: ил.

75. Черноволов, В.А. Расчет равномерности дождевания машиной непрерывного поступательного движения по результатам испытания аппарата радиальным методом / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко, Д.Н. Протасов // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2015619265 от 19.11.2015.

76. Казаков, С.П. Рациональная расстановка дождевальных насадок / С.П. Казаков // Гидротехника и мелиорация. – 1953. – № 4. – С. 37–44.

77. **РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАВНОМЕРНОСТИ ДОЖДЕВАНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИСПЫТАНИЯ АППАРАТА РАДИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ** ʏ j tɑdtsɔtsdtsɔ ɹ.ϕ., ʂ tɑƠɔuj dɫ̈tsʃ ..ɹ., ɪ tɑsls Ofɪtsɔ ɾ.ɭ . Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2016. № 1 (21). С. 182-195.

78. Машины и установки дождевальные. Программа и методы испытаний: РД 10.11.1-89; Введ. 01.05.89. – Москва: Госагропром СССР, 1988. – 173 с.

79. Бредихин, Н.П. Прибор для улавливания дождевых осадков / Н.П. Бредихин. – Новочеркасск: ЮжНИИГиМ, 1986. – 7 с.

80. Box G.E.P., Behnken D.W. Some Uew Three Level for the Study of Quantitative Variables-Technometrics. – 1960. – V. 2. – № 4.

81. Черноволов, В.А. Расчет показателей равномерности дождевания по результатам испытания аппарата радиальным методом / В.А. Черноволов, Л.В. Кравченко, Д.Н. Протасов // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015618182 от 3.08.2015.

82. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – Москва: Машиностроение, 1981. – 184 с.

83. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика / В.Е. Гмурман. – Москва: Высшая школа, 1977.

84. Колемаев, В.А. Теория вероятностей и математическая статистика / В.А. Колемаев, О.В. Староверов, В.Б. Турундаевский. – Москва: Высшая школа, 1991. – 400 с.

85. Соляник, Н.М. Системы орошаемого земледелия Северного Кавказа / Н.М. Соляник, В.И. Харечкин. – Москва: Росагропромиздат, 1988.

86. Воронов, Ю.И. Сельскохозяйственные машины / Ю.И. Воронов,

Л.Н. Ковалев, А.Н. Устинов. – Москва: АО «Агропромиздат», 1990.

87. Гордон, Б.С. Оптимизация параметров искусственного дождя дождевальных машин кругового действия: диссертация кандидата технических наук / Б.С. Гордон. – Москва, 1990.

88. Wiloox J.C., Swailes G.E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers // Sc.Agr. – 1947. – V. 27. –№ 11. – P. 565–583.

89. Ochler Th. Grundlagen der Wasserverteilung durch Beregnunga gerate // Bericht. Landtechn. – 1949. – V. 5. – S. 5–78.

90. Cuyon M. Le material d'irrigation par aspersion // Genie Rual. – 1958. – V. 51. – № 4. – P. 169–173.

91. Witte K. Ursachtn und Verhutung von Bodenachaden durch kunstliche Beregnung // Wasser und Boden. – 1956. – Bd. 8. – H. 6. – S. 151–158.

92. Колесник, Ф.И. Методы определения равномерности дождя при испытании дождевальных машин / Ф.И. Колесник // Гидротехника и мелиорация. – 1959. – № 4. – С. 43–50.

93. Колесник, Ф.И. Теория и расчет показателей эффективности полива при разработке, оценке и выборе дождевальных машин: автореферат диссертации доктора технических наук / Ф.И. Колесник. – 1976. – 38 с.

94. Чаудхри, Ф.Х. Равномерность полива при дождевании / Ф.Х. Чаудхри, С.М. Вилелла, Х. Сатто // Прогрессивные способы орошения, включая машинное орошение. – Москва, 1975. – С. 146–150.

95. Краснощеков, В.С. К вопросу размещения слоя осадков при дождевании / В.С. Краснощеков // Новое в технике и технологии полива. – Москва, 1980. – С. 72–81.

96. Сильченко, И.С. Определение поливной нормы при работе дождевальной машины «Фрегат» / И.С. Сильченко // Сб. науч. тр. Московского гидромелиоративного ин-та. – Москва, 1981. – Т. 71. – С. 51–57.

97. Кружилин, И.П. Структура дождя и параметры техники полива дождевальных машин кругового действия / И.П. Кружилин, П.И. Кузнецов // Вестник с.-х. науки. – 1980. – № 8. – С. 126–130.

98. Кузнецов, П.И. Исследование параметров структуры дождя и качества полива машин кругового действия в Волгоградском Заволжье: диссертация кандидата технических наук / П.И. Кузнецов. – Новочеркасск, 1983. – 238 с.

99. Полонский, А.М. Исследование гидравлических параметров широкозахватной дождевальной техники / А.М. Полонский // Сб. науч. тр. / ВНИИМиТП. – 1974. – Т. V. – С. 29–59.

100. Гусейн-Заде, С.Х. Определение конструктивных параметров многоопорных дождевальных машин / С.Х. Гусейн-Заде // Прогрессивные способы орошения, включая машинное орошение: сб. статей. – Москва, 1975. – С. 103–111.

101. Гусейн-Заде, С.Х. Многоопорные дождевальные машины / С.Х. Гусейн-Заде, Л.А. Перевезенцев, В.И. Коваленко. – Москва: Колос, 1976. – 176 с.

102. Lionel R. Mechanized sprinkler irrigation / FAO. – Rome, 1982.

103. Meynink W.I.C. Sizing of central pivot irrigation systems // Arg. Eng. Austral. – 1980. – V. 9. – № 1. – P. 25–35.

104. Hummel H.G. Niederschlagsverteilung von Regnern mit geradliniger oder kreisformiger Vorwatsbewegung // Agrartechn. – 1975. – Bd. 25. – H. 10. – S. 502–504.

105. Рыжко, Н.Ф. К вопросу о распределении интенсивности дождя вдоль радиуса действия среднеструйных аппаратов / Н.Ф. Рыжко, В.М. Кузик, А.С. Фалькович // Вопросы эксплуатации оросительных систем и рационального использования орошаемых земель в Поволжье. – Москва, 1986. – С. 112–117.

106. Ильясов, Ш.И. Исследование движения сопла дождевального аппарата в условиях равномерного полива / Ш.И. Ильясов // Вестник сельхознауки Казахстана. – 1980. – № 10. – С. 80–82.

107. Рекомендации по применению серийных дождевальных аппаратов. – Коломна: ВНИИМиТП, 1984.

108. Митрюхин, А.А. Показатели оценки технологических схем работы фронтальных дождевальных машин / А.А. Митрюхин, Л.А. Перевезенцев // Сб. науч. тр. / ВНИИГиМ, 1984.

109. Колесник, Ф.И. Оценка качества работы и эффективность дождевальных машин / Ф.И. Колесник // Сб. науч. тр. / ВО «Союзводпроект». – 1981. – Вып. 65. – Москва.

110. Машины и установки дождевальные. Программа и методы испытания: РД10.11.1-89; Введ. 01.05.89. – Москва: Госагропром СССР, 1988.

111. Современные методы разработки и оценки технологий и технологических средств полива / В.Ф. Абрамов, В.И. Ивашкин, Л.В. Лапшин и др. – Москва, 1986.

112. Угрюмов, А.В. Перспективы развития механизации полива в СССР / А.В. Угрюмов, В.Ф. Носенко, Г.А. Ландес // Основные направления технического прогресса в области механизации и техники полива. – Москва, 1985.

113. Лапшин, Л.В. Внесение удобрений и гербицидов с поливной водой / Л.В. Лапшин, В.П. Бояр, К.М. Кушхов // Достижения науки и техники в АПК. – 1988. – № 11.

114. Элер, Т. Распределение воды дождевальным аппаратом / Т. Элер // Дождевание / ВНИИГиМ. – Москва, 1934.

115. Бредихин, Н.П. Улучшение качества полива дольнеструйными дождевателями при ветре / Н.П. Бредихин // Гидротехника и мелиорация. – 1970. – № 8.

116. Ветроустойчивый дождевальный аппарат / Б.Н. Лебедев, Г.П. Лямперт, А.А. Бальбеков, Ю.А. Чернышев // Техника и технология механизированного орошения. – Москва, 1982.

117. Тугуши, Г.Е. Исследование некоторых характеристик дождевальной струи в связи с орошением наклонных поверхностей и склонов / Г.Е. Тугуши, Г.Е. Кацаева // Орошение земель в горных и предгорных условиях Грузии. – Тбилиси, 1985.

118. Цицишвили, Т.З. Математическая модель задачи подбора и оптимального размещения дождевальных аппаратов на горных и предгорных склонах / Т.З. Цицишвили, Н.Ш. Босикашвили // Орошение земель в горных и предгорных условиях Грузии. – Тбилиси, 1985.

119. Тугуши, Г.Е. Некоторые результаты парметров компановки дождевальных аппаратов при поливе склонов / Г.Е. Тугуши, П.Г. Тугуши // Рациональное использование водных ресурсов и повышение эксплуатационных характеристик гидромелиоративных систем. – Тбилиси, 1987.

120. Тугуши, Г.Е. Дождевальный аппарат для полива склонов и методика его расчета / Г.Е. Тугуши // Науч. тр. Грузинского СХИ. – 1982. – Т. 126.

121. Лямперт, Г.П. Исследование и разработка дальнеструйных дождевальных машин повышенной производительности: автореферат диссертации кандидата технических наук / Г.П. Лямперт. – Москва, 1970.

122. Никулин, С.Н. Дождевальная машина «Кубань» / С.Н. Никулин, А.А. Смирнов // Гидротехника и мелиорация. – 1981. – № 7.

123. Рекомендации по применению серийных дождевальных аппаратов. – Коломна: ВНИИМиТП, 1984. – 69 с.

124. Матвеев, В.А. Техническое нормирование ремонтных работ в сельском хозяйстве / В.А. Матвеев, И.И. Пустовалов // Техническое нормирование ремонтных работ в сельском хозяйстве. – Москва: Колос, 1979.

125. **ОСНОВЫ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ПРАКТИКУМ** ɣ j tɑdtsɘtsdtsɔ ɹ.ɸ. Учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению "Агроинженерия" / Зерноград, 2014.

126. **ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ НАСАДОК НА ТРУБОПРОВОДЕ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ НЕПРЕРЫВНОГО ФРОНТАЛЬНОГО ДЕЙСТВИЯ** ɣ j tɑdtsɘtsdtsɔ ɹ.ɸ., ʂ tɑƆɔuj dɸtsʃ .ɹ. Вестник Донского государственного технического университета. 2009. Т. 9. № 1 (40). С. 74-81.

127. Николаев, Н.Н. Оптимизация процесса доставки разнородных мелкопартионных грузов в условиях курортного города / Н.Н. Николаев // Вестник аграрной науки Дона. – 2011. –№ 3 – С. 46–51.

128. **ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ НА БАЗЕ КОЛЕСНЫХ ТРАКТОРОВ** ʂ tɑƆɔuj dɸtsɹ.ɸ., ʃ вj tɑj dɟtsʕ ɹ.ɸ., ʂ tɑƆɔuj dɸtsʃ .ɹ. Технология колесных и гусеничных машин. 2014.№ 6. С. 45-50.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А

Программа *MD(A)* **– Расчет дозы дождевания одноструйными аппаратами при работе на четырех позициях** – моделирует работу четырех стационарных дождевальных аппаратов при расстоянии между позициями большем максимального радиуса зоны дождевания. Аппараты расположены в углах квадрата $A \times A$. Дозы дождевания от четырех аппаратов на зачетной площадке суммируются так, что количество воды, попадающей на неё равно расходу через один аппарат, умноженному на время дождевания.

Для работы программы используются числовые характеристики дальностей полета капель: математическое ожидание $M_\rho$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma_\rho$, полученные экспериментально. Кроме того, задаются следующие исходные данные: расход воды через аппарат $Q$, время дождевания $T$. Аргументом в программе является расстояние между аппаратами $A$, которое задается целым числом. Рекомендуется принимать расстояние между аппаратами большим максимального радиуса зоны дождевания. Программа считает дозу и при шаге установки аппаратов меньшем радиуса дождевания, но коэффициент полноты учета при этом меньше единицы.

Программа делит площадь $A \times A$ на метровые квадраты и вычисляет дозу дождевания в центре каждого квадрата. Результат сохраняет в виде матрицы доз $M_{i,j}$. Количество элементов матрицы равно произведению $A \times A$.

Программа имеет два цикла. В первом изменяется координата $Y$ метрового квадрата, во втором – координата $м$. В центре каждого квадрата вычисляет интенсивность дождевания от каждого из аппаратов, суммирует интенсивности, умножает результат на время дождевания, получает дозу полива, кг/м$^2$, заполняет матрицу.

Результат выводится в виде матрицы доз (рисунок П.1).

$$
\begin{aligned}
MD(A) := \;& Q \leftarrow 2 \\
& T \leftarrow 2000 \\
& M\rho \leftarrow 10 \\
& \sigma\rho \leftarrow 3 \\
& B \leftarrow A \\
& \text{for } j \in 0 .. (A-1) \\
& \quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \; Y_j \leftarrow j + 0.5 \\
& \qquad n \leftarrow A - 1 \\
& \qquad \text{for } i \in 0 .. n \\
& \qquad\quad Z_i \leftarrow \; X_i \leftarrow i + 0.5 \\
& \qquad\qquad Z_i \leftarrow \left[ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \right] \ldots \\
& \qquad\qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\
& \qquad\qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\
& \qquad\qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \\
& \qquad\qquad Z_i \\
& \qquad Z \\
& D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
& D_{i,j} \\
& D
\end{aligned}
$$

$MD(10) =$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 21.824 | 22.937 | 23.589 | 23.807 | 23.826 | 23.826 |
| 1 | 22.937 | 24.56 | 25.58 | 26.079 | 26.249 | 26.249 |
| 2 | 23.589 | 25.58 | 26.955 | 27.725 | 28.042 | 28.042 |
| 3 | 23.807 | 26.079 | 27.725 | 28.703 | 29.131 | 29.131 |
| 4 | 23.826 | 26.249 | 28.042 | 29.131 | 29.619 | 29.619 |
| 5 | 23.826 | 26.249 | 28.042 | 29.131 | 29.619 | 29.619 |
| 6 | 23.807 | 26.079 | 27.725 | 28.703 | 29.131 | 29.131 |
| 7 | 23.589 | 25.58 | 26.955 | 27.725 | 28.042 | 28.042 |
| 8 | 22.937 | 24.56 | 25.58 | 26.079 | 26.249 | 26.249 |
| 9 | 21.824 | 22.937 | 23.589 | 23.807 | 23.826 | 23.826 |

Рисунок П.1 – Программа расчета дозы орошения между четырьмя стационарными аппаратами, размещенными в углах квадрата $\phi\check{I}\ \phi$

Приложение Б

Программа *KV(A)* – вычисляет матрицу доз на учетной площадке $\phi\check{I}\ \phi$ и по матрице доз – коэффициент вариации (рисунок П.2).

$$
\begin{aligned}
&Kv(A) := \\
&\quad Q \leftarrow 2 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho \leftarrow 10 \\
&\quad \sigma\rho \leftarrow 3 \\
&\quad B \leftarrow A \\
&\quad \text{for } j \in 0..(A-1) \\
&\qquad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \\
&\qquad\quad Y_j \leftarrow j + 0.5 \\
&\qquad\quad n \leftarrow A - 1 \\
&\qquad\quad \text{for } i \in 1..n \\
&\qquad\qquad Z_i \leftarrow \\
&\qquad\qquad\quad X_i \leftarrow i + 0.5 \\
&\qquad\qquad\quad Z_i \leftarrow \left[ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2\cdot\pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \right] \ldots \\
&\qquad\qquad\qquad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2\cdot\pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\
&\qquad\qquad\qquad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2\cdot\pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\
&\qquad\qquad\qquad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2\cdot\pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \\
&\qquad\qquad Z_i \\
&\qquad Z \\
&\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
&\quad D_{i,j} \\
&\quad D \\
&\quad Dis \leftarrow var(D) \\
&\quad M \leftarrow mean(D) \\
&\quad Kv \leftarrow \frac{\sqrt{Dis}}{M} \cdot 100 \\
&\quad Kv \\
&i := 0..12 \qquad A_i := i + 6
\end{aligned}
$$

$A =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 6 |
| 1 | 7 |
| 2 | 8 |
| 3 | 9 |
| 4 | 10 |
| 5 | 11 |
| 6 | 12 |
| 7 | 13 |
| 8 | 14 |
| 9 | 15 |
| 10 | 16 |
| 11 | 17 |
| 12 | 18 |

$Kv(A_i) =$

| |
|---|
| 46.418 |
| 41.87 |
| 38.064 |
| 35.412 |
| 34.437 |
| 35.313 |
| 37.613 |
| 40.535 |
| 43.327 |
| 45.559 |
| 47.147 |
| 48.21 |
| 48.874 |

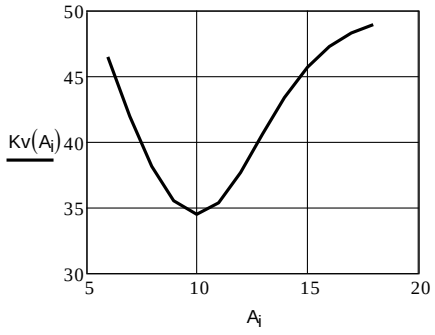



Рисунок П.2 – Программа вычисления коэффициента вариации дозы орошения на площади $\phi\check{I}\ \phi$

Приложение В

Программа *Ke(A)* **– Расчет эффективности дождевания одноструйными аппаратами при работе на четырех позициях** – моделирует работу четырех стационарных дождевальных аппаратов при расстоянии между позициями, большем максимального радиуса зоны дождевания. Аппараты расположены в углах квадрата $A \times A$. Дозы дождевания от четырех аппаратов на зачетной площадке суммируются так, что количество воды, попадающей на неё, равно расходу через один аппарат, умноженному на время дождевания.

Для работы программы используются числовые характеристики дальностей полета капель: математическое ожидание $M_\rho$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma_\rho$, полученные экспериментально. Кроме того, задаются следующие исходные данные: расход воды через аппарат $Q$, время дождевания $T$. Аргументом в программе является расстояние между аппаратами $\phi$, которое задается целым числом. Рекомендуется принимать расстояние между аппаратами больше максимального радиуса зоны дождевания. Программа считает дозу и при шаге установки аппаратов меньшем радиуса дождевания, но коэффициент полноты учета при этом меньше единицы.

Программа делит площадь $A \times A$ на метровые квадраты и вычисляет дозу дождевания в центре каждого квадрата. Результат сохраняет в виде матрицы доз $M_{i,j}$. Количество элементов матрицы равно произведению $A \times A$.

Программа имеет два цикла. В первом изменяется координата $Y$ метрового квадрата, во втором – координата $X$. В центре каждого квадрата вычисляет интенсивность дождевания от каждого из аппаратов, суммирует интенсивности, умножает результат на время дождевания, получает дозу полива, кг/м$^2$, заполняет матрицу.

По матрице доз программа вычисляет среднюю дозу. Далее вычисляет граничные значения дозы эффективного полива и назначает границы вариационного ряда доз. Средний класс имеет границы эффективного полива. Далее с помощью стандартной программы *hist* программа находит частоту классов. Отношение частоты среднего класса к сумме частот классов дает коэффициент эффективного полива.

Результат выводится в виде коэффициента эффективного полива.

При задании внешнего цикла по шагу установки аппаратов выводится вектор $V1_i$ или график *Ke(A)* (рисунок П.3).

Программа *Ke1(A)* дополнительно вычисляет коэффициенты: недостаточного, эффективного, избыточного полива и полноты учета (рисунок П.4).

$$
\begin{aligned}
Ke(A) := \;& Q \leftarrow 2 \\
& T \leftarrow 2000 \\
& M\rho \leftarrow 10 \\
& \sigma\rho \leftarrow 3 \\
& B \leftarrow A \\
& \text{for } j \in 0..(A-2) \\
& \quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \left| \begin{array}{l} Y_j \leftarrow j + 0.5 \\ n \leftarrow A - 2 \\ \text{for } i \in 0..n \\ \quad Z_i \leftarrow \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow i + 0.5 \\ Z_i \leftarrow \left[ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \right] \ldots \\ \quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \\ Z_i \end{array} \right. \\ Z \end{array} \right. \\
& D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
& D_{i,j} \\
& M \leftarrow mean(D) \\
& \Delta n \leftarrow M - 0.25 \cdot M \\
& \Delta v \leftarrow M + 0.25 \cdot M \\
& Mid \leftarrow min(D) \\
& Mad \leftarrow max(D) \\
& j \leftarrow 0..3 \\
& Int_0 \leftarrow 0 \\
& Int_1 \leftarrow \Delta n \\
& Int_2 \leftarrow \Delta v \\
& Int_3 \leftarrow 2 \cdot M \\
& Int \\
& n \leftarrow hist(Int, D) \\
& Kef \leftarrow \frac{n_1}{\sum n} \\
& Ke \leftarrow Kef \\
& Ke
\end{aligned}
$$

$Ke(10) = 1 \qquad i := 0..15 \qquad A_i := i + 5 \qquad V1_i := Ke(A_i)$

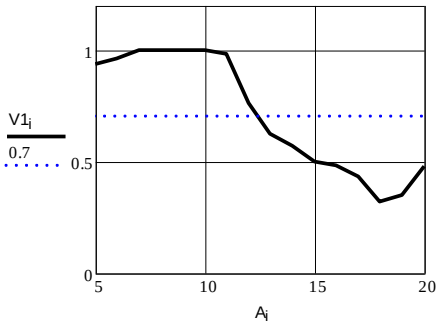



Рисунок П.3 – Программа *Ke(A)* вычисления коэффициента эффективности орошения односопловым аппаратом на площади $\phi\check{I}\,\phi$

$$
\begin{aligned}
&Ke1(A) := \\
&\quad Q \leftarrow 2 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho \leftarrow 10 \\
&\quad \sigma\rho \leftarrow 3 \\
&\quad B \leftarrow A \\
&\quad \text{for } j \in 0..(A-2) \\
&\quad\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \left| \begin{array}{l} Y_j \leftarrow j + 0.5 \\ n \leftarrow A - 2 \\ \text{for } i \in 0..n \\ \quad Z_i \leftarrow \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow i + 0.5 \\ Z_i \leftarrow \left[ Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \right] \ldots \\ \qquad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \\ Z_i \end{array} \right. \\ Z \end{array} \right. \\
&\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
&\quad D_{i,j} \\
&\quad M \leftarrow mean(D) \\
&\quad \Delta n \leftarrow M - 0.25 \cdot M \\
&\quad \Delta v \leftarrow M + 0.25 \cdot M \\
&\quad Mid \leftarrow min(D) \\
&\quad Mad \leftarrow max(D) \\
&\quad j \leftarrow 0..3 \\
&\quad Int_0 \leftarrow 0 \\
&\quad Int_1 \leftarrow \Delta n \\
&\quad Int_2 \leftarrow \Delta v \\
&\quad Int_3 \leftarrow 2 \cdot M \\
&\quad Int \\
&\quad n \leftarrow hist(Int, D) \\
&\quad Ky \leftarrow \frac{\sum n \cdot M}{Q \cdot T} \\
&\quad Kef \leftarrow \frac{n_1}{\sum n} \\
&\quad Knd \leftarrow \frac{n_0}{\sum n} \\
&\quad Kiz \leftarrow \frac{n_2}{\sum n} \\
&\quad Ke_0 \leftarrow Knd \\
&\quad Ke_1 \leftarrow Kef \\
&\quad Ke_2 \leftarrow Kiz \\
&\quad Ke_3 \leftarrow Ky \\
&\quad Ke
\end{aligned}
$$

Рисунок П.4 *Ѳ*– Программа вычисления показателей эффективности коэффициентов орошения: недостаточного, эффективного и избыточного полива, полноты учета

$$Ke1(18) = \begin{pmatrix} 0.266 \\ 0.318 \\ 0.415 \\ 0.925 \end{pmatrix} \quad Ke1(12) = \begin{pmatrix} 0.107 \\ 0.76 \\ 0.132 \\ 0.75 \end{pmatrix} \quad Ke1(10) = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0.535 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} Knd \\ Kef \\ Kiz \\ Ky \end{pmatrix}$$

$i := 0..3 \quad j := 0..8 \quad A_j := j + 9 \quad M_{i,j} := Ke1(A_j)_i \quad M_{4,j} := A_j$

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0.01 & 0.107 & 0.174 & 0.243 & 0.25 & 0.253 & 0.27 \\ 1 & 1 & 0.98 & 0.76 & 0.625 & 0.568 & 0.5 & 0.48 & 0.43 \\ 0 & 0 & 0.01 & 0.132 & 0.201 & 0.189 & 0.25 & 0.267 & 0.301 \\ 0.406 & 0.535 & 0.653 & 0.75 & 0.821 & 0.869 & 0.897 & 0.913 & 0.921 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 \end{pmatrix}$$

$i := 0..3 \quad j := 0..15 \quad A_j := j + 5 \quad M_{i,j} := Ke1(A_j)_i \quad M_{4,j} := A_j$

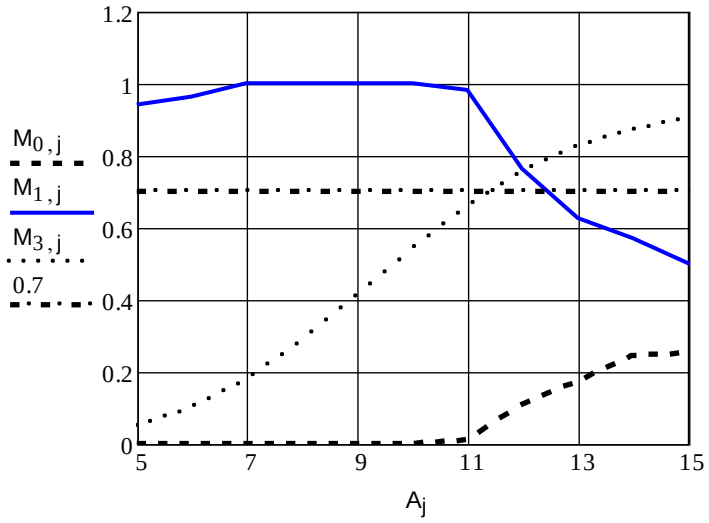



Рисунок П.4 *в* – Вывод результатов счета программой *Ke*1(*A*) вычисления коэффициентов: недостаточного, эффективного и избыточного полива, полноты учета четырьмя односопловыми аппаратами

Приложение Д

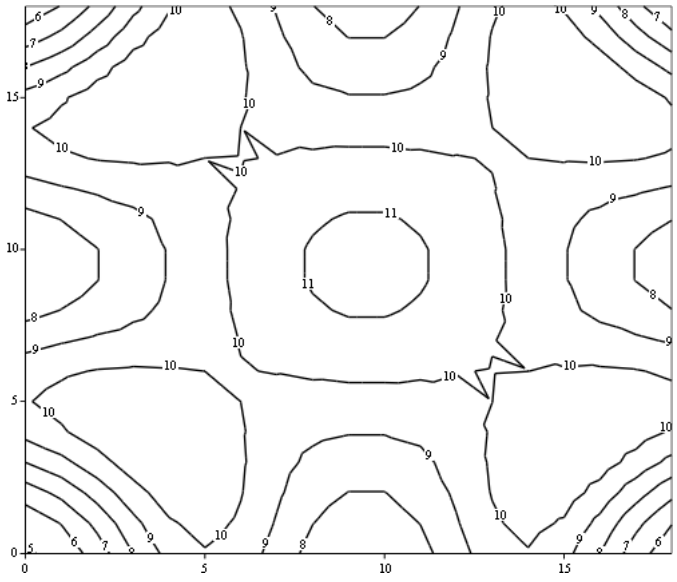
Программа *D1(A)* (рисунок П.5 *Ѳ*) вычисляет дозу полива на учетной площади размером А×А двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций. Результат выводит в виде матрицы доз или в виде контурного графика (рисунок П.5 *в*)

```
D1(A) :=
  Q ← 2
  T ← 2000
  Mρ1 ← 15
  σρ1 ← 5
  Mρ2 ← 6
  σρ2 ← 2
  C1 ← 0.8
  C2 ← 0.2
  B ← A
  n1 ← A − 2
  for j ∈ 0 .. n1
    D1^⟨j⟩ ← | Y_j ← j + 0.5
             | n ← A − 2
             | for i ∈ 0 .. n
             |   Z_i ← | X_i ← i + 0.5
             |          | Z_i ← (Q·T)/(2·π) · [ [ C1·dnorm[√((X_i)^2 + (Y_j)^2), Mρ1, σρ1] / √((X_i)^2 + (Y_j)^2)
             |          |                     + C2·dnorm[√((X_i)^2 + (Y_j)^2), Mρ2, σρ2] / √((X_i)^2 + (Y_j)^2) ...
             |          |                     + C1·dnorm[√((X_i − B)^2 + (Y_j)^2), Mρ1, σρ1] / √((X_i − B)^2 + (Y_j)^2)
             |          |                     + C2·dnorm[√((X_i − B)^2 + (Y_j)^2), Mρ2, σρ2] / √((X_i − B)^2 + (Y_j)^2) ] ...
             |          |                   + [ C1·dnorm[√((X_i − B)^2 + (Y_j − A)^2), Mρ1, σρ1] / √((X_i − B)^2 + (Y_j − A)^2)
             |          |                     + C2·dnorm[√((X_i − B)^2 + (Y_j − A)^2), Mρ2, σρ2] / √((X_i − B)^2 + (Y_j − A)^2) ...
             |          |                     + C1·dnorm[√((X_i)^2 + (Y_j − A)^2), Mρ1, σρ1] / √((X_i)^2 + (Y_j − A)^2)
             |          |                     + C2·dnorm[√((X_i)^2 + (Y_j − A)^2), Mρ2, σρ2] / √((X_i)^2 + (Y_j − A)^2) ] ]
             |          | Z_i
             | Z
    D1^⟨j⟩ ← Z
  D1_{i, j}
  D1
```

Рисунок П.5 *Ѳ*– Программа расчета дозы орошения двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций

D1(20) =

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 4.887 | 5.279 | 6.479 | 8.007 | 9.343 | 9.927 |
| 1 | 5.279 | 6.047 | 7.273 | 8.715 | 9.89 | 10.309 |
| 2 | 6.479 | 7.273 | 8.42 | 9.638 | 10.491 | 10.624 |
| 3 | 8.007 | 8.715 | 9.638 | 10.487 | 10.921 | 10.754 |
| 4 | 9.343 | 9.89 | 10.491 | 10.921 | 10.98 | 10.638 |
| 5 | 9.927 | 10.309 | 10.624 | 10.754 | 10.638 | 10.334 |
| 6 | 9.566 | 9.859 | 10.051 | 10.115 | 10.072 | 9.997 |
| 7 | 8.612 | 8.915 | 9.156 | 9.353 | 9.541 | 9.762 |
| 8 | 7.656 | 8.02 | 8.387 | 8.775 | 9.2 | 9.663 |
| 9 | 7.109 | 7.522 | 7.981 | 8.493 | 9.055 | 9.645 |
| 10 | 7.109 | 7.522 | 7.981 | 8.493 | 9.055 | 9.645 |
| 11 | 7.656 | 8.02 | 8.387 | 8.775 | 9.2 | 9.663 |
| 12 | 8.612 | 8.915 | 9.156 | 9.353 | 9.541 | 9.762 |




D1(20)

Рисунок П.5 *в* – Вывод результатов счета программой расчета дозы орошения двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций

$$
\begin{aligned}
&\text{,ke2(A)} := \\
&\quad Q \leftarrow 2 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho 1 \leftarrow 15 \\
&\quad \sigma\rho 1 \leftarrow 5 \\
&\quad M\rho 2 \leftarrow 6 \\
&\quad \sigma\rho 2 \leftarrow 2 \\
&\quad B \leftarrow A \\
&\quad C1 \leftarrow 0.8 \\
&\quad C2 \leftarrow 0.2 \\
&\quad n1 \leftarrow A - 1 \\
&\quad \text{for } j \in 0..n1 \\
&\qquad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \left| \begin{array}{l} Y_j \leftarrow j + 0.5 \\ n \leftarrow A - 1 \\ \text{for } i \in 0..n \\ \quad Z_i \leftarrow \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow i + 0.5 \\ Z_i \leftarrow \dfrac{Q \cdot T}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \begin{array}{l} \dfrac{C1 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} + \dfrac{C2 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ + \dfrac{C1 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j)^2}} + \dfrac{C2 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ + \dfrac{C1 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j - A)^2}} + \dfrac{C2 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i - B)^2 + (Y_j - A)^2}} \ldots \\ + \dfrac{C1 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j - A)^2}} + \dfrac{C2 \cdot dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j - A)^2}} \end{array} \right] \\ Z_i \end{array} \right. \\ Z \end{array} \right. \\
&\qquad D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
&\quad D_{i,j} \\
&\quad D \\
&\quad M \leftarrow mean(D) \\
&\quad \Delta n \leftarrow M - 0.25 \cdot M \\
&\quad \Delta v \leftarrow M + 0.25 \cdot M \\
&\quad Mid \leftarrow min(D) \\
&\quad Mad \leftarrow max(D) \\
&\quad j \leftarrow 0..3 \\
&\quad Int_0 \leftarrow 0 \\
&\quad Int_1 \leftarrow \Delta n \\
&\quad Int_2 \leftarrow \Delta v \\
&\quad Int_3 \leftarrow 2 \cdot M \\
&\quad Int \\
&\quad n \leftarrow hist(Int, D) \\
&\quad Kef \leftarrow \frac{n_1}{\sum n} \\
&\quad Knd \leftarrow \frac{n_0}{\sum n} \\
&\quad Kiz \leftarrow \frac{n_2}{\sum n} \\
&\quad Ke2_0 \leftarrow Knd \\
&\quad Ke2_1 \leftarrow Kef \\
&\quad Ke2_2 \leftarrow Kiz \\
&\quad Ke2
\end{aligned}
$$

Рисунок П.6 *О*– Программа расчета эффективности орошения двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций

Программа *Ke*2(*A*) вычисляет коэффициенты эффективности полива двухсопловым аппаратом с четырех позиций. Результат выводит в виде вектора коэффициентов: недостаточного, эффективного и избыточного полива. При добавлении внешнего цикла по шагу установки $\phi$ результат можно выводить в виде матрицы или графика (рисунок П.6 *в*).

$$Ke2(20) = \begin{pmatrix} 0.06 \\ 0.94 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$i := 0..2 \qquad j := 0..40 \qquad A_j := j + 10 \qquad M1_{i,j} := Ke2(A_j)_i \qquad M1_{3,j} := A_j$

$M1 =$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0.12 | 0.099 | 0.083 | 0.071 | 0.061 | 0.053 |
| 1 | 0.88 | 0.901 | 0.917 | 0.929 | 0.939 | 0.947 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

$\begin{pmatrix} Knd \\ Kef \\ Kiz \\ A \end{pmatrix}$

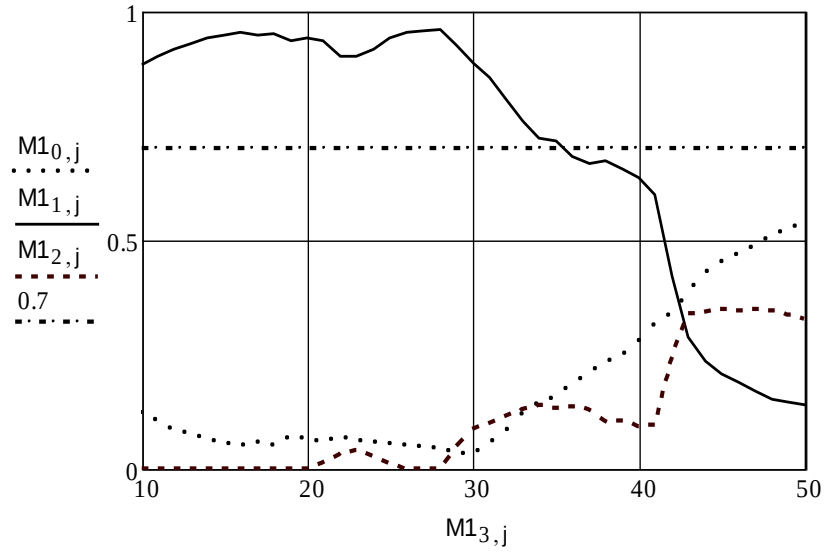



Рисунок П.6 *в* – Вывод результатов счета программой *Ke*2(*A*) расчета эффективности орошения двухсопловым аппаратом типа «Роса-3» с четырех позиций

Приложение Ж

Программа *Ke12(A)* **– Расчет показателей эффективности дождевания одноструйными аппаратами при работе на двенадцати позициях** – моделирует работу двенадцати стационарных дождевальных аппаратов при расстоянии между позициями, меньшем максимального радиуса зоны дождевания. Центральные аппараты расположены в углах квадрата $A \times A$. Боковые аппараты выдают на площадку $A \times A$ некоторую часть своего расхода. Дозы дождевания от двенадцати аппаратов на зачетной площадке суммируются так, что количество воды, попадающей на неё, равно расходу через один аппарат, умноженному на время дождевания.

Для работы программы используются числовые характеристики дальностей полета капель: математическое ожидание $M_\rho$ и среднее квадратическое отклонение $\sigma_\rho$, полученные экспериментально. Кроме того, задаются следующие исходные данные: расход воды через аппарат $Q$, время дождевания $T$. Аргументом в программе является расстояние между аппаратами $\phi$, которое задается целым числом. Рекомендуется принимать расстояние между аппаратами меньше максимального радиуса зоны дождевания.

Программа делит площадь $A \times A$ на метровые квадраты и вычисляет дозу дождевания в центре каждого квадрата. Результат сохраняет в виде матрицы доз $M_{i,j}$. Количество элементов матрицы равно произведению $A \times A$.

Программа имеет два цикла. В первом изменяется координата $Y$ метрового квадрата, во втором – координата $X$. В центре каждого квадрата вычисляет интенсивность дождевания от каждого из двенадцати аппаратов, суммирует интенсивности, умножает результат на время дождевания, получает дозу полива, кг/м$^2$, заполняет матрицу.

По матрице доз программа вычисляет среднюю, минимальную и максимальную дозы, коэффициент равномерности дождевания Христиансена. Далее вычисляет граничные значения дозы эффективного полива и назначает границы вариационного ряда доз. Средний класс имеет границы эффективного полива. Далее с помощью стандартной программы *hist* программа находит частоту классов. Отношение частоты среднего класса к сумме частот классов дает коэффициент эффективного полива. Отношение суммы доз на зачетной площади к произведению $Q \cdot T$ дает коэффициент полноты учета, то есть количество воды на зачетной площади, деленное на общее количество воды, выданное аппаратом за время дождевания.

Результат выводится в виде вектора, включающего коэффициенты: Христиансена, недостаточного, эффективного, избыточного полива и коэффициент полноты учета: *CDU, Knd, Kef, Kiz, Ky*.

При добавлении внешнего цикла по $\phi$ получаем матрицу коэффициентов и график (рисунок П.7 *в*).

$$
\begin{aligned}
&Ke12(A) := \\
&\quad Q \leftarrow 2 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho \leftarrow 10 \\
&\quad \sigma\rho \leftarrow 3 \\
&\quad B \leftarrow A \\
&\quad \text{for } j \in 0..(A-1) \\
&\qquad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \left| \begin{array}{l} Y_j \leftarrow j + 0.5 \\ n \leftarrow A - 1 \\ \text{for } i \in 0..n \\ \qquad Z_i \leftarrow \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow i + 0.5 \\ Z_i \leftarrow Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i + A)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i + A)^2 + (Y_j - A)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(A + X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(A + X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A + Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{[(A - X)_i]^2 + (A + Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{[(2 \cdot A - X)_i]^2 + (Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}} \ldots \\ \qquad\quad + Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{dnorm\left[\sqrt{(X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}} \\ \qquad Z_i \end{array} \right. \\ Z \end{array} \right. \\
&\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
&\quad D_{i,j} \\
&\quad M \leftarrow mean(D) \\
&\quad \Delta n \leftarrow M - 0.25 \cdot M \\
&\quad \Delta v \leftarrow M + 0.25 \cdot M \\
&\quad Mid \leftarrow min(D) \\
&\quad Mad \leftarrow max(D) \\
&\quad j \leftarrow 0..3 \\
&\quad Int_0 \leftarrow 0 \\
&\quad Int_1 \leftarrow \Delta n \\
&\quad Int_2 \leftarrow \Delta v \\
&\quad Int_3 \leftarrow 2 \cdot M \\
&\quad Int \\
&\quad n \leftarrow hist(Int, D) \\
&\quad Ky \leftarrow \frac{M \cdot \sum n}{Q \cdot T} \\
&\quad Kef \leftarrow \frac{n_1}{\sum n} \\
&\quad Knd \leftarrow \frac{n_0}{\sum n} \\
&\quad Kiz \leftarrow \frac{n_2}{\sum n} \\
&\quad Ke_0 \leftarrow Knd \\
&\quad Ke_1 \leftarrow Kef \\
&\quad Ke_2 \leftarrow Kiz \\
&\quad Ke_3 \leftarrow Ky \\
&\quad Ke
\end{aligned}
$$

Рисунок П.7 *Ѳ*– Программа *Ke12(A)* вычисления показателей равномерности дождевания односопловым аппаратом с двенадцати позиций

$$Ke12(18) = \begin{pmatrix} 0.296 \\ 0.272 \\ 0.432 \\ 0.999 \end{pmatrix} \quad Ke12(14) = \begin{pmatrix} 0.204 \\ 0.571 \\ 0.224 \\ 0.999 \end{pmatrix} \quad Ke12(13) = \begin{pmatrix} 0.071 \\ 0.781 \\ 0.148 \\ 0.999 \end{pmatrix} \quad Ke12(22) = \begin{pmatrix} 0.281 \\ 0.471 \\ 0.248 \\ 0.999 \end{pmatrix}$$

$i := 0..3 \quad j := 0..8 \quad A_j := j + 9 \quad M_{i,j} := Ke12(A_j)_i \quad M_{4,j} := A_j$

$$M = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0.071 & 0.204 & 0.231 & 0.297 & 0.304 \\ 1 & 1 & 1 & 0.972 & 0.781 & 0.571 & 0.516 & 0.469 & 0.346 \\ 0 & 0 & 0 & 0.028 & 0.148 & 0.224 & 0.253 & 0.234 & 0.349 \\ 0.976 & 0.991 & 0.997 & 0.999 & 0.999 & 0.999 & 0.999 & 0.999 & 0.999 \\ 9 & 10 & 11 & 12 & 13 & 14 & 15 & 16 & 17 \end{pmatrix}$$

$i := 0..3 \quad j := 0..8 \quad A_j := j + 10 \quad M_{i,j} := Ke12(A_j)_i \quad M_{4,j} := A_j$

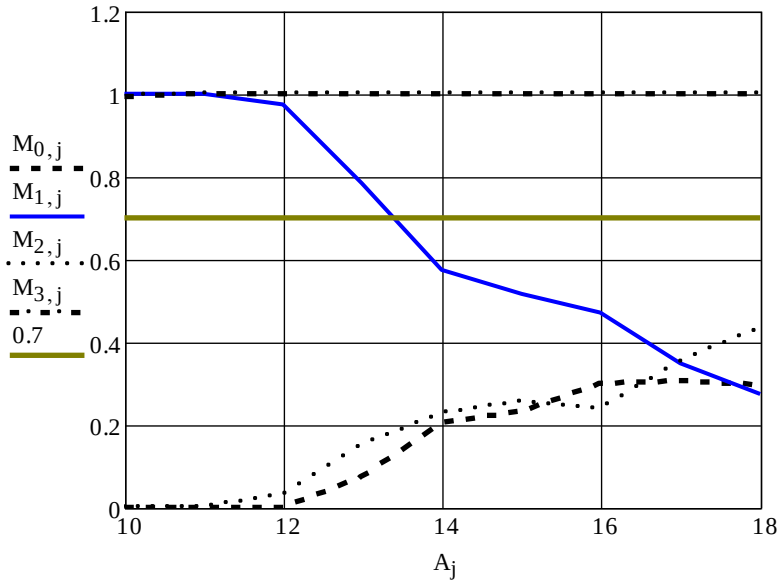



Рисунок П.7 *в* – Вывод результатов счета программой *Ke12(A)* вычисления показателей равномерности дождевания односопловым аппаратом с двенадцати позиций

Приложение 3

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{Ke2S12(A)} := \\
&\quad Q \leftarrow 2 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho 1 \leftarrow 15 \\
&\quad \sigma\rho 1 \leftarrow 5 \\
&\quad C1 \leftarrow 0.8 \\
&\quad C2 \leftarrow 0.2 \\
&\quad M\rho 2 \leftarrow 7 \\
&\quad \sigma\rho 2 \leftarrow 2 \\
&\quad B \leftarrow A \\
&\quad \text{for } j \in 0 \mathinner{..} (A-1) \\
&\quad\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \left| \begin{array}{l} Y_j \leftarrow j + 0.5 \\ n \leftarrow A - 1 \\ \text{for } i \in 0 \mathinner{..} n \\ \quad Z_i \leftarrow \left| \begin{array}{l} X_i \leftarrow i + 0.5 \\ Z_i \leftarrow Q \cdot T \cdot \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{C1 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \right. \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i + A)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i + A)^2 + (Y_j - A)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i + A)^2 + (Y_j - A)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i + A)^2 + (Y_j - A)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A + X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(A + X_i)^2 + (Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A + X_i)^2 + (Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(A + X_i)^2 + (Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A + Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (A + Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (A + Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (A + Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X)_i^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(A - X)_i^2 + (A + Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X)_i^2 + (A + Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(A - X)_i^2 + (A + Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(2 \cdot A - X_i)^2 + (A - Y_j)^2}} \ldots \\ \quad + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}} + \frac{C2 \cdot \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(A - X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(A - X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}} \ldots \\ \quad \left. + C1 \cdot \frac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}} + \frac{C2 - \mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X_i)^2 + (2 \cdot A - Y_j)^2}} \right] \\ \quad Z_i \end{array} \right. \\ Z \end{array} \right. \\
&\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow Z \\
&\quad D_{i,j} \\
&\quad M \leftarrow \mathrm{mean}(D) \\
&\quad M1 \leftarrow \overrightarrow{|D - M|} \\
&\quad CDU \leftarrow 100 \cdot \left(1 - \frac{\mathrm{mean}(M1)}{M}\right) \\
&\quad Ke_0 \leftarrow CDU \\
&\quad \Delta n \leftarrow M - 0.25 \cdot M \\
&\quad \Delta v \leftarrow M + 0.25 \cdot M \\
&\quad Mid \leftarrow \min(D) \\
&\quad Mad \leftarrow \max(D) \\
&\quad j \leftarrow 0 \mathinner{..} 3 \\
&\quad Int_0 \leftarrow 0 \\
&\quad Int_1 \leftarrow \Delta n \\
&\quad Int_2 \leftarrow \Delta v \\
&\quad Int_3 \leftarrow 2 \cdot M \\
&\quad Int \\
&\quad n \leftarrow \mathrm{hist}(Int, D) \\
&\quad Ky \leftarrow \frac{M \cdot \sum n}{Q \cdot T} \\
&\quad Kef \leftarrow \frac{n_1}{\sum n} \\
&\quad Knd \leftarrow \frac{n_0}{\sum n} \\
&\quad Kiz \leftarrow \frac{n_2}{\sum n} \\
&\quad Ke_1 \leftarrow Knd \\
&\quad Ke_2 \leftarrow Kef \\
&\quad Ke_3 \leftarrow Kiz \\
&\quad Ke_4 \leftarrow Ky \\
&\quad Ke
\end{aligned}
$$

Рисунок П.8 *О*– Программа расчета показателей равномерности орошения двухсопловым аппаратом с двенадцати позиций

$i := 0..4 \quad j := 0..30 \quad A1_j := j + 20 \quad M1_{i,j} := Ke2S12(A1_j)_i \quad M1_{5,j} := A1_j$

$M1 =$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | |
|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 92.067 | 91.068 | 90.403 | 90.123 | CDU |
| 1 | 0.043 | 0.054 | 0.062 | 0.064 | Knd |
| 2 | 0.957 | 0.946 | 0.938 | 0.936 | Kef |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | Kiz |
| 4 | 1.408 | 1.429 | 1.449 | 1.47 | Ky |
| 5 | 20 | 21 | 22 | 23 | A |

Рисунок П.8 *в* – Вывод результатов счета программой расчета показателей равномерности орошения двухсопловым аппаратом с двенадцати позиций

$$i := 0..100 \qquad X_i := i + 0.5 \qquad j := 0..190 \qquad Y_j := j - 50.5$$

$$Z4(X, Y) := \left| \begin{array}{l}
Q \leftarrow 30 \\
T \leftarrow 2000 \\
M\rho \leftarrow 30 \\
\sigma\rho \leftarrow 10 \\
A \leftarrow 90 \\
B \leftarrow 50 \\
M\alpha \leftarrow 0 \\
\sigma\alpha \leftarrow 0.3 \\
A\alpha \leftarrow 1.2 \\
\alpha min \leftarrow -A\alpha - \sigma\alpha \\
\alpha max \leftarrow A\alpha + \sigma\alpha \\
\alpha 1 \leftarrow \operatorname{asin}\left(\dfrac{Y}{\sqrt{X^2 + Y^2}}\right) \\
\alpha 2 \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y}{\sqrt{(X-B)^2 + Y^2}}\right] & \text{if } X > B \\ \pi & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
\alpha 3 \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{(X-B)^2 + (Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > B \\ \pi & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
\alpha 4 \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{X^2 + (Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > 0 \\ \pi & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
f(\alpha 1) \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(\operatorname{pnorm}\left(\dfrac{A\alpha - \alpha 1 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - \operatorname{pnorm}\left(\dfrac{-A\alpha - \alpha 1 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 1 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
f(\alpha 2) \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(\operatorname{pnorm}\left(\dfrac{A\alpha - \alpha 2 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - \operatorname{pnorm}\left(\dfrac{-A\alpha - \alpha 2 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 2 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
f(\alpha 3) \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(\operatorname{pnorm}\left(\dfrac{A\alpha - \alpha 3 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - \operatorname{pnorm}\left(\dfrac{-A\alpha - \alpha 3 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 3 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
f(\alpha 4) \leftarrow \left| \begin{array}{ll} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(\operatorname{pnorm}\left(\dfrac{A\alpha - \alpha 4 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - \operatorname{pnorm}\left(\dfrac{-A\alpha - \alpha 4 + M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 4 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{array} \right. \\
F \leftarrow Q\cdot T\cdot\left[\begin{array}{l} f(\alpha 1)\cdot\dfrac{\operatorname{dnorm}\left(\sqrt{X^2 + Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2 + Y^2}} + f(\alpha 2)\cdot\dfrac{\operatorname{dnorm}\left[\sqrt{(X-B)^2 + Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X-B)^2 + Y^2}} \ldots \\ + \left[f(\alpha 3)\cdot\dfrac{\operatorname{dnorm}\left[\sqrt{(X-B)^2 + (Y-A)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(X-B)^2 + (Y-A)^2}} + f(\alpha 4)\cdot\dfrac{\operatorname{dnorm}\left[\sqrt{X^2 + (Y-A)^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{X^2 + (Y-A)^2}}\right] \end{array}\right] \\
Z \leftarrow F
\end{array} \right.$$

Рисунок П.9 *О*– Программа моделирования распределения воды односопловым дальнеструйным аппаратом с четырех позиций при работе по сектору

$M4_{i,j} := Z4(X_i, Y_j)$ $i := 0 .. 100$ $X_i := i + 0.5$

$j := 0 .. 190$ $Y_j := j - 50.5$

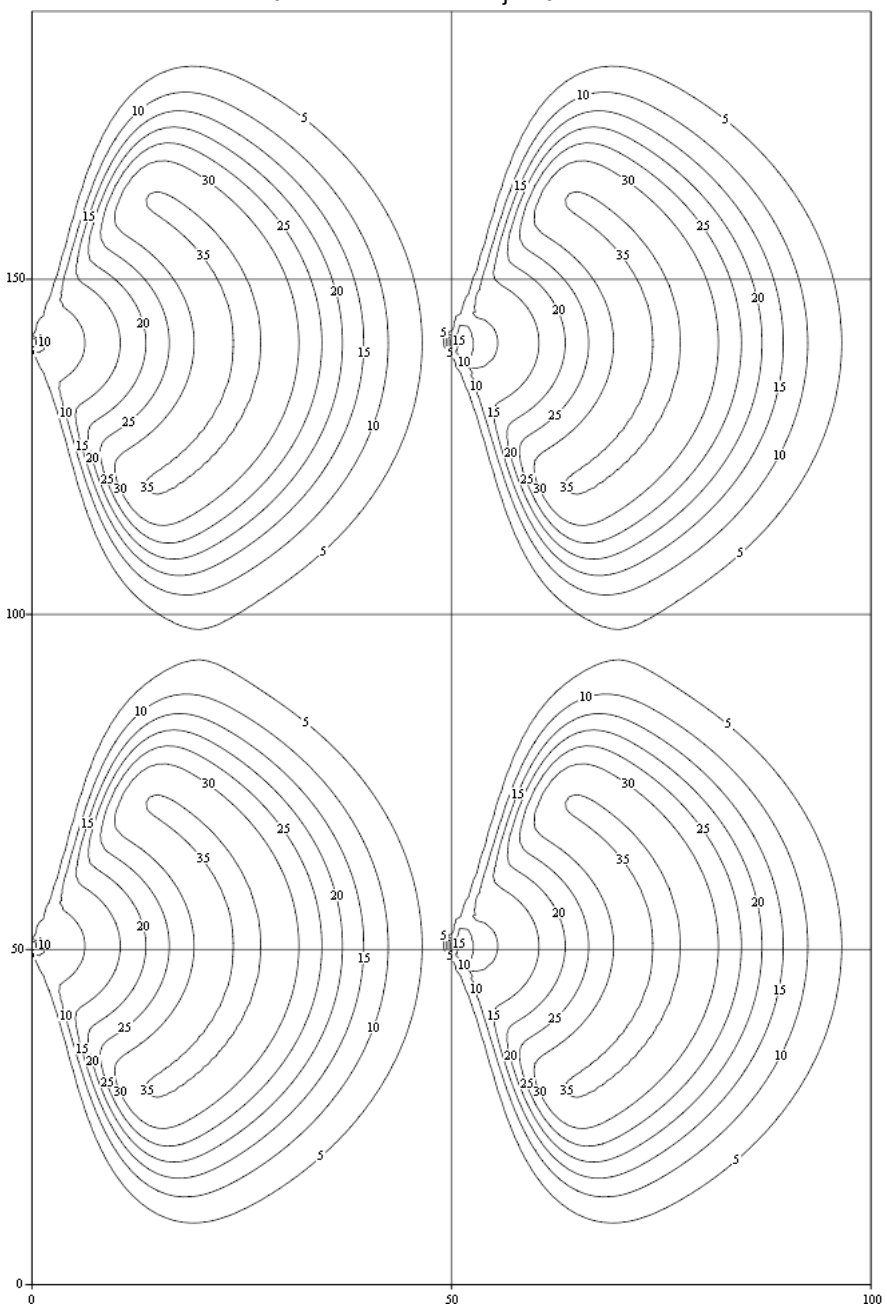


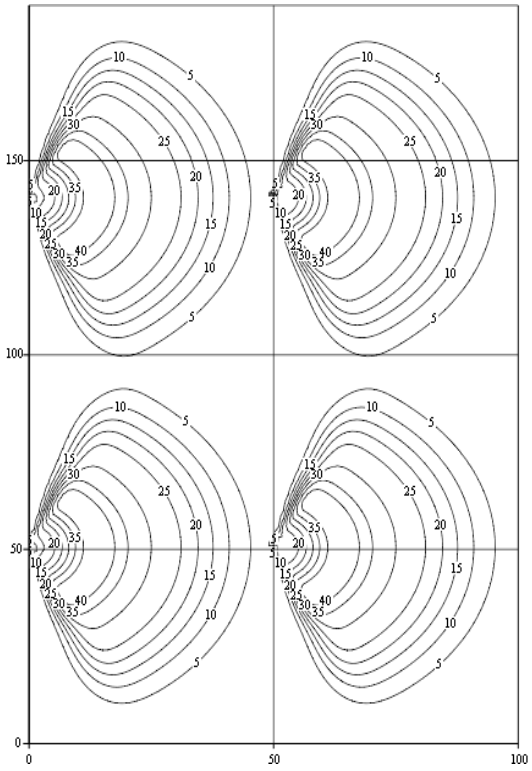

Рисунок П.9 *в* – Вывод результатов счета программой моделирования распределения воды односопловым дальнеструйным аппаратом с четырех позиций при работе по сектору

$$
\begin{aligned}
&ZS2(X,Y) := \\
&\quad Q \leftarrow 30 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho 1 \leftarrow 30 \\
&\quad \sigma\rho 1 \leftarrow 10 \\
&\quad M\rho 2 \leftarrow 15 \\
&\quad \sigma\rho 2 \leftarrow 5 \\
&\quad C1 \leftarrow 0.8 \\
&\quad C2 \leftarrow 0.2 \\
&\quad A \leftarrow 90 \\
&\quad B \leftarrow 50 \\
&\quad M\alpha \leftarrow 0 \\
&\quad \sigma\alpha \leftarrow 0.3 \\
&\quad A\alpha \leftarrow 1.2 \\
&\quad \alpha min \leftarrow -A\alpha - \sigma\alpha \\
&\quad \alpha max \leftarrow A\alpha + \sigma\alpha \\
&\quad \alpha 1 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left(\dfrac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}}\right) & \text{if } X > 0 \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 2 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y}{\sqrt{(X-B)^2+Y^2}}\right] & \text{if } X > B \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 3 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > B \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 4 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{X^2+(Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > 0 \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 1) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 1+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 1+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 1 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 2) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 2+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 2+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 2 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 3) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 3+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 3+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 3 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 4) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 4+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right) - pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 4+M\alpha}{\sigma\alpha}, M\alpha, \sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 4 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad F \leftarrow Q\cdot T\cdot\left[C1\cdot\left[\dfrac{f(\alpha 1)\cdot dnorm\left(\sqrt{X^2+Y^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}} + \dfrac{f(\alpha 2)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+Y^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X-B)^2+Y^2}} \ldots\right.\right. \\
&\qquad \left.\left. + \dfrac{f(\alpha 3)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}} + \dfrac{f(\alpha 4)\cdot dnorm\left[\sqrt{X^2+(Y-A)^2}, M\rho 1, \sigma\rho 1\right]}{\sqrt{X^2+(Y-A)^2}}\right] \ldots\right] \\
&\qquad + C2\cdot\left[\dfrac{f(\alpha 1)\cdot dnorm\left(\sqrt{X^2+Y^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}} + \dfrac{f(\alpha 2)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+Y^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X-B)^2+Y^2}} \ldots\right. \\
&\qquad \left. + \dfrac{f(\alpha 3)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}} + \dfrac{f(\alpha 4)\cdot dnorm\left[\sqrt{X^2+(Y-A)^2}, M\rho 2, \sigma\rho 2\right]}{\sqrt{X^2+(Y-A)^2}}\right] \\
&\quad Z \leftarrow F
\end{aligned}
$$

Рисунок П.10 *Ѳ*– Программа моделирования распределения воды двухсопловым дальнеструйным аппаратом на четырех позициях при работе по сектору

$MS2_{i,j} := ZS2(X_i, Y_j)$ $C1 := 0.8$ $C2 := 0.2$

$i := 0 .. 100$ $X_i := i + 0.5$ $j := 0 .. 190$ $Y_j := j - 50.5$




MS2

MS2 =

| | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | $1.305 \cdot 10^{-3}$ | $1.696 \cdot 10^{-3}$ |
| 4 | $1.601 \cdot 10^{-3}$ | $2.136 \cdot 10^{-3}$ | $2.83 \cdot 10^{-3}$ | $3.723 \cdot 10^{-3}$ |
| 5 | $3.216 \cdot 10^{-3}$ | $4.336 \cdot 10^{-3}$ | $5.804 \cdot 10^{-3}$ | $7.718 \cdot 10^{-3}$ |
| 6 | $6.139 \cdot 10^{-3}$ | $8.346 \cdot 10^{-3}$ | 0.011 | 0.015 |
| 7 | 0.011 | 0.015 | 0.021 | 0.028 |
| 8 | 0.019 | 0.026 | 0.036 | 0.049 |
| 9 | 0.032 | 0.044 | 0.06 | 0.081 |
| 10 | 0.049 | 0.068 | 0.094 | 0.128 |
| 11 | 0.074 | 0.102 | 0.14 | 0.191 |
| 12 | 0.105 | 0.145 | 0.199 | 0.271 |

Рисунок П.10 *в* – Вывод результатов счета программой моделирования распределения воды двухсопловым дальнеструйным аппаратом на четырех позициях при работе по сектору

$$
\begin{aligned}
&ZS2P6(X,Y) := \\
&\quad Q \leftarrow 30 \\
&\quad T \leftarrow 2000 \\
&\quad M\rho 1 \leftarrow 30 \\
&\quad \sigma\rho 1 \leftarrow 10 \\
&\quad M\rho 2 \leftarrow 15 \\
&\quad \sigma\rho 2 \leftarrow 5 \\
&\quad C1 \leftarrow 0.8 \\
&\quad C2 \leftarrow 0.2 \\
&\quad A \leftarrow 90 \\
&\quad B \leftarrow 50 \\
&\quad M\alpha \leftarrow 0 \\
&\quad \sigma\alpha \leftarrow 0.3 \\
&\quad A\alpha \leftarrow 1.1 \\
&\quad \alpha min \leftarrow -A\alpha - \sigma\alpha \\
&\quad \alpha max \leftarrow A\alpha + \sigma\alpha \\
&\quad \alpha 1 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left(\dfrac{Y}{\sqrt{X^2+Y^2}}\right) & \text{if } X > 0 \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 2 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y}{\sqrt{(X-B)^2+Y^2}}\right] & \text{if } X > B \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 3 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > B \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 4 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{X^2+(Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > 0 \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 5 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y}{\sqrt{(X-2B)^2+Y^2}}\right] & \text{if } X > 2\cdot B \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad \alpha 6 \leftarrow \begin{cases} \operatorname{asin}\left[\dfrac{Y-A}{\sqrt{(X-2\cdot B)^2+(Y-A)^2}}\right] & \text{if } X > 2\cdot B \\ \pi & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 1) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 1+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)-pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 1+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 1 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 2) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 2+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)-pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 2+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 2 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 3) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 3+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)-pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 3+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 3 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 4) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 4+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)-pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 4+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 4 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 5) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 5+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)-pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 5+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 5 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad f(\alpha 6) \leftarrow \begin{cases} \dfrac{1}{2\cdot A\alpha}\cdot\left(pnorm\left(\dfrac{A\alpha-\alpha 6+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)-pnorm\left(\dfrac{-A\alpha-\alpha 6+M\alpha}{\sigma\alpha},M\alpha,\sigma\alpha\right)\right) & \text{if } \alpha min \le \alpha 6 \le \alpha max \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \\
&\quad F \leftarrow Q\cdot T\cdot\left[C1\cdot\left[\dfrac{f(\alpha 1)\cdot dnorm\left(\sqrt{X^2+Y^2},M\rho 1,\sigma\rho 1\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}}+\dfrac{f(\alpha 2)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+Y^2},M\rho 1,\sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X-B)^2+Y^2}}\ldots\right.\right. \\
&\qquad \left.+\dfrac{f(\alpha 3)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2},M\rho 1,\sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}}+\dfrac{f(\alpha 4)\cdot dnorm\left[\sqrt{X^2+(Y-A)^2},M\rho 1,\sigma\rho 1\right]}{\sqrt{X^2+(Y-A)^2}}\ldots\right. \\
&\qquad \left.\left.+\dfrac{f(\alpha 5)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-2\cdot B)^2+Y^2},M\rho 1,\sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X-2\cdot B)^2+Y^2}}+\dfrac{f(\alpha 6)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-2\cdot B)^2+(Y-A)^2},M\rho 1,\sigma\rho 1\right]}{\sqrt{(X-2\cdot B)^2+(Y-A)^2}}\right]\ldots\right. \\
&\qquad \left.+C2\cdot\left[\dfrac{f(\alpha 1)\cdot dnorm\left(\sqrt{X^2+Y^2},M\rho 2,\sigma\rho 2\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}}+\dfrac{f(\alpha 2)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+Y^2},M\rho 2,\sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X-B)^2+Y^2}}\ldots\right.\right. \\
&\qquad \left.+\dfrac{f(\alpha 3)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2},M\rho 2,\sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X-B)^2+(Y-A)^2}}+\dfrac{f(\alpha 4)\cdot dnorm\left[\sqrt{X^2+(Y-A)^2},M\rho 2,\sigma\rho 2\right]}{\sqrt{X^2+(Y-A)^2}}\ldots\right. \\
&\qquad \left.\left.+\dfrac{f(\alpha 5)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-2\cdot B)^2+Y^2},M\rho 2,\sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X-2\cdot B)^2+Y^2}}+\dfrac{f(\alpha 6)\cdot dnorm\left[\sqrt{(X-2\cdot B)^2+(Y-A)^2},M\rho 2,\sigma\rho 2\right]}{\sqrt{(X-2\cdot B)^2+(Y-A)^2}}\right]\right] \\
&\quad Z \leftarrow F
\end{aligned}
$$

Рисунок П.11 *Ѳ*– Программа моделирования распределения воды двухсопловым дальнеструйным аппаратом на шести позициях при работе по сектору

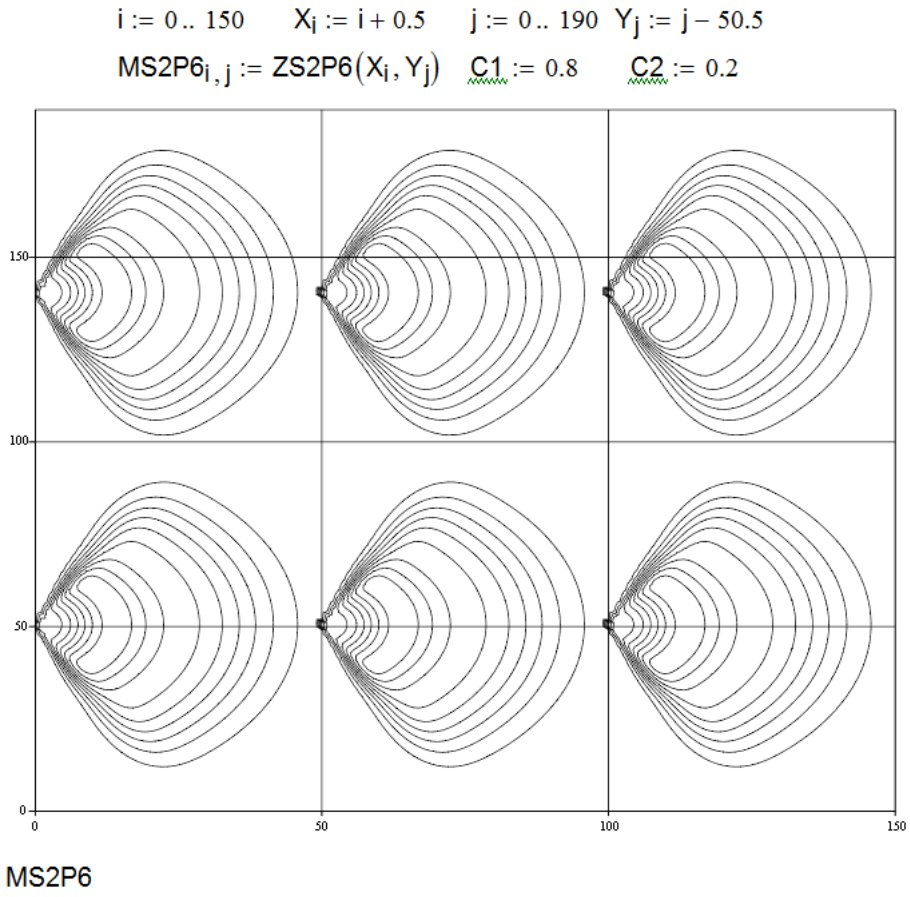



Рисунок П.11 *в* – Вывод результатов счета программой моделирования распределения воды двухсопловым дальнеструйным аппаратом на шести позициях при работе по сектору

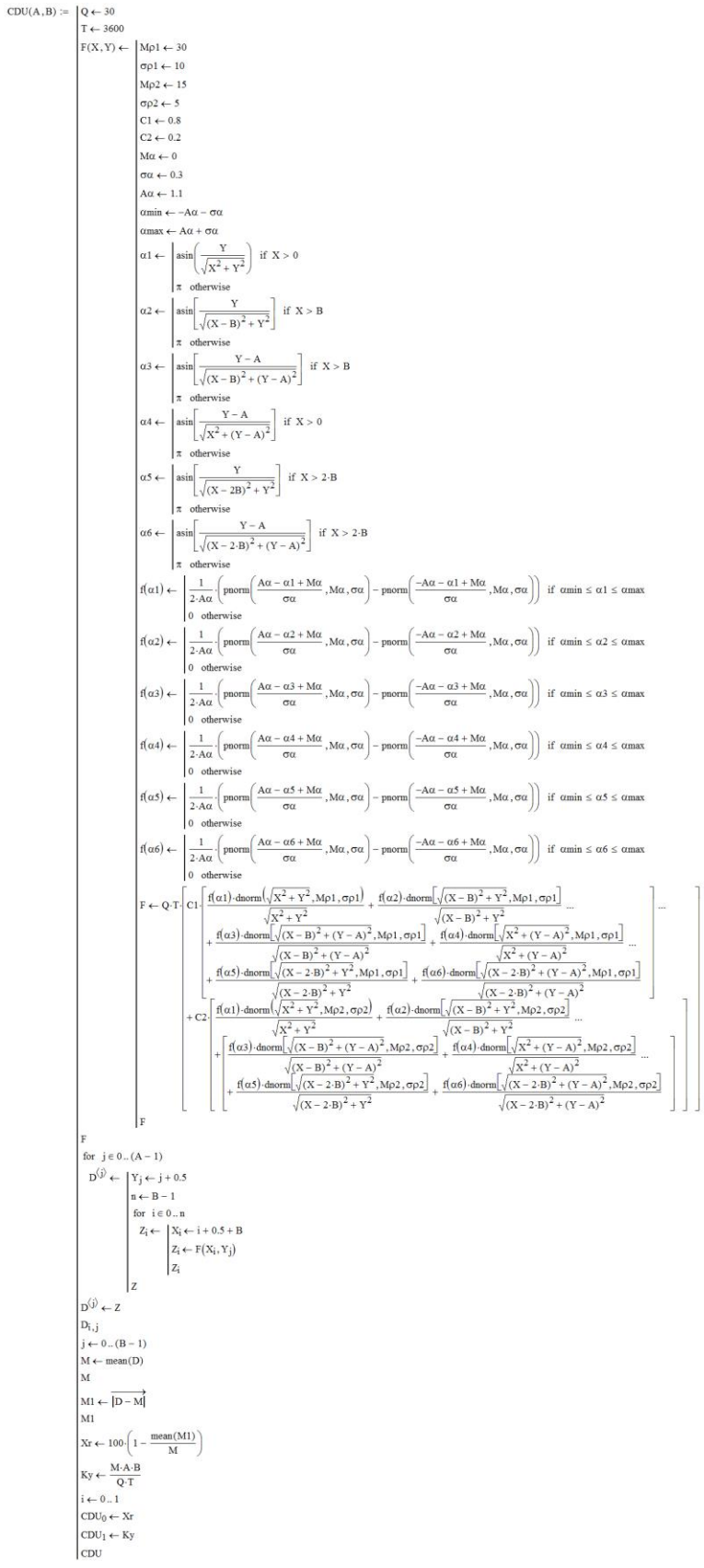



Рисунок П.12 *О*– Программа расчета равномерности дождевания двухсопловым аппаратом с шести позиций

$$CDU(50,40) = \begin{pmatrix} 60.378 \\ 0.998 \end{pmatrix}$$

$i := 0..20 \qquad A_i := 2 \cdot i + 20 \qquad j := 0..20 \qquad B_j := 2 \cdot j + 10$

$M_{i,j} := CDU(A_i, B_j)_0$

$M =$

| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 81.846 | 81.129 | 79.992 | 79.835 | 81.062 | 81.603 |
| 1 | 82.167 | 81.512 | 80.174 | 79.872 | 81.126 | 81.951 |
| 2 | 82.188 | 82.055 | 80.563 | 80.19 | 81.369 | 82.38 |
| 3 | 81.789 | 82.396 | 81.143 | 80.758 | 81.84 | 82.969 |
| 4 | 81.064 | 82.423 | 81.685 | 81.369 | 82.384 | 83.629 |
| 5 | 80.378 | 82.129 | 81.943 | 81.87 | 82.838 | 84.08 |
| 6 | 79.854 | 81.719 | 82.048 | 82.269 | 83.264 | 84.513 |
| 7 | 79.503 | 81.398 | 82.051 | 82.553 | 83.616 | 84.834 |
| 8 | 79.33 | 81.169 | 82.003 | 82.791 | 83.955 | 85.098 |
| 9 | 79.227 | 81.065 | 81.999 | 82.948 | 84.207 | 85.244 |
| 10 | 79.054 | 81.052 | 82.002 | 82.988 | 84.328 | 85.26 |
| 11 | 78.61 | 80.986 | 81.962 | 82.938 | 84.294 | 85.113 |
| 12 | 77.822 | 80.72 | 81.828 | 82.745 | 84.086 | 84.797 |

Рисунок П.12 *в* – Вывод результатов счета равномерности дождевания программой *CDU(A, B)*

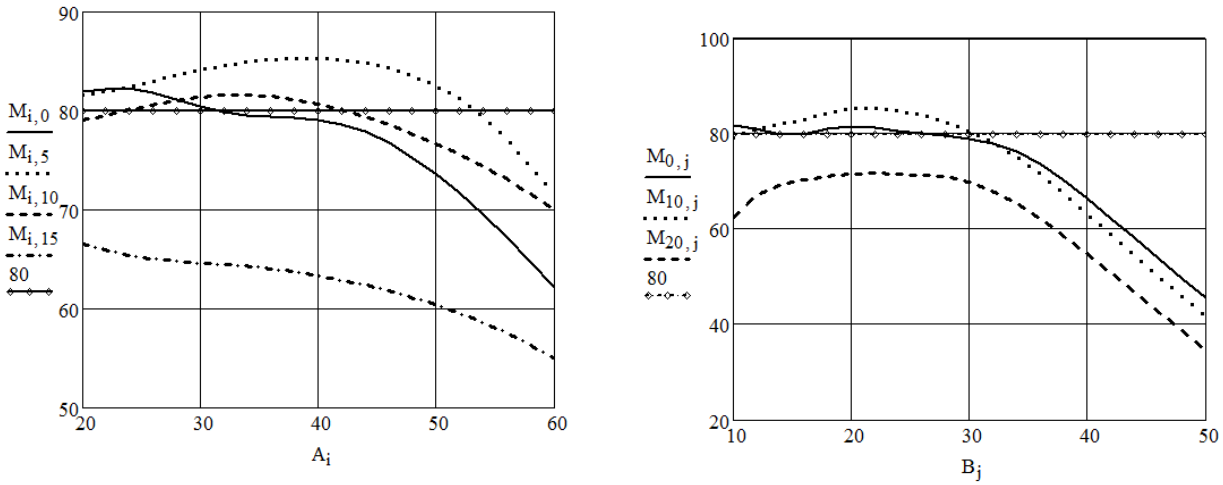



Рисунок П.12 *ə* – Результаты счета равномерности дождевания программой *CDU(A, B)*

$$
\begin{aligned}
&\text{Ifr} := \left|\begin{array}{l}
n1 \leftarrow 10 \\
\text{for } j \in 0..n1 \\
\quad D^{\langle j\rangle} \leftarrow \left|\begin{array}{l}
Xo_j \leftarrow j + 0.5 \\
Ro1 \leftarrow 10 \\
B \leftarrow 10 \\
R1 \leftarrow 20 \\
Q \leftarrow 1 \\
Q1 \leftarrow 1.4 \\
R2 \leftarrow 30 \\
\omega \leftarrow \dfrac{2\cdot\pi}{40\cdot 3600} \\
M\rho \leftarrow 4.2 \\
\sigma\rho \leftarrow 1.7 \\
\alpha m \leftarrow \operatorname{asin}\left(\dfrac{Ro1}{R1}\right) \\
n \leftarrow 50 \\
\text{for } i \in 0..n \\
\quad F_i \leftarrow \left|\begin{array}{l}
\alpha_i \leftarrow -\alpha m + i\cdot\dfrac{2\alpha m}{n} \\
I(X,Y) \leftarrow Q\cdot\dfrac{1}{2\cdot\pi}\cdot\dfrac{\operatorname{dnorm}\left(\sqrt{X^2+Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}} \ldots \\
\qquad + Q1\cdot\dfrac{1}{2\cdot\pi}\cdot\dfrac{\operatorname{dnorm}\left[\sqrt{(B-X)^2+Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B-X)^2+Y^2}} \\
X_i \leftarrow \left(R1 + Xo_j\right)\cdot\cos\left(\alpha_i\right) - R1 \\
Y_i \leftarrow \left(R1 + Xo_j\right)\cdot\sin\left(\alpha_i\right) \\
F_i \leftarrow I\left(X_i, Y_i\right) \\
F_i
\end{array}\right. \\
F
\end{array}\right. \\
D^{\langle j\rangle} \leftarrow F\cdot 3600 \\
D_{i,j} \\
D
\end{array}\right.
\end{aligned}
$$

Рисунок П.13 *О*– Программа расчета интенсивности орошения машиной кругового действия

Ifr =

| | 6 | 7 | 8 | 9 |
|---|---|---|---|---|
| 20 | 0.013 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| 21 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.013 |
| 22 | 0.015 | 0.014 | 0.013 | 0.011 |
| 23 | 0.016 | 0.014 | 0.011 | $9.511 \cdot 10^{-3}$ |
| 24 | 0.016 | 0.014 | 0.01 | $8.876 \cdot 10^{-3}$ |
| 25 | 0.016 | 0.013 | 0.01 | $9.821 \cdot 10^{-3}$ |
| 26 | 0.016 | 0.014 | 0.01 | $8.876 \cdot 10^{-3}$ |
| 27 | 0.016 | 0.014 | 0.011 | $9.511 \cdot 10^{-3}$ |
| 28 | 0.015 | 0.014 | 0.013 | 0.011 |
| 29 | 0.014 | 0.014 | 0.014 | 0.013 |
| 30 | 0.013 | 0.014 | 0.014 | 0.014 |
| 31 | 0.011 | 0.012 | 0.013 | 0.013 |
| 32 | $8.43 \cdot 10^{-3}$ | 0.01 | 0.011 | 0.012 |

Рисунок П.13 *в* – Вывод результатов счета программой расчета интенсивности орошения машиной кругового действия

$$
\begin{aligned}
&\mathrm{CDUfr3}(B) := \left|\begin{array}{l}
n1 \leftarrow B - 1 \\
\text{for } j \in 0..n1 \\
\quad D^{\langle j \rangle} \leftarrow \left|\begin{array}{l}
Xo_j \leftarrow j + 0.5 \\
Ro1 \leftarrow 10 \\
R1 \leftarrow 200 \\
Q \leftarrow 7.8 \\
Q1 \leftarrow 8.1 \\
R2 \leftarrow R1 + B \\
\omega \leftarrow \dfrac{2\cdot\pi}{40\cdot 3600} \\
M\rho \leftarrow 4.2 \\
\sigma\rho \leftarrow 1.7 \\
\alpha m \leftarrow \operatorname{asin}\left(\dfrac{Ro1}{R1 + Xo_j}\right) \\
n \leftarrow 50 \\
\text{for } i \in 0..n \\
\quad F_i \leftarrow \left|\begin{array}{l}
\alpha_i \leftarrow -\alpha m + i\cdot\dfrac{2\alpha m}{n} \\
I(X,Y) \leftarrow Q\cdot\dfrac{1}{2\cdot\pi}\cdot\dfrac{\mathrm{dnorm}\left(\sqrt{X^2+Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right)}{\sqrt{X^2+Y^2}} \ldots \\
\qquad + Q1\cdot\dfrac{1}{2\cdot\pi}\cdot\dfrac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(B-X)^2+Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B-X)^2+Y^2}} \ldots \\
\qquad + Q\cdot\dfrac{1}{2\cdot\pi}\cdot\dfrac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(B+X)^2+Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(B+X)^2+Y^2}} \ldots \\
\qquad + Q\cdot\dfrac{1}{2\cdot\pi}\cdot\dfrac{\mathrm{dnorm}\left[\sqrt{(2\cdot B-X)^2+Y^2}, M\rho, \sigma\rho\right]}{\sqrt{(2\cdot B-X)^2+Y^2}} \\
X_i \leftarrow (R1 + Xo_j)\cdot\cos(\alpha_i) - R1 \\
Y_i \leftarrow (R1 + Xo_j)\cdot\sin(\alpha_i) \\
F_i \leftarrow I(X_i, Y_i)\cdot 2\cdot\dfrac{\alpha m}{n\cdot\omega} \\
F_i
\end{array}\right. \\
F
\end{array}\right. \\
D^{\langle j \rangle} \leftarrow F \\
D_{i,j} \\
\text{for } j \in 0..n1 \\
\quad \left|\begin{array}{l}
VD_j \leftarrow \sum D^{\langle j \rangle} \\
VD_j
\end{array}\right. \\
VD \\
j \leftarrow 0..n1 \\
Vsr \leftarrow \mathrm{mean}(VD) \\
Vsr \\
\Delta V \leftarrow \overrightarrow{|VD - Vsr|} \\
\Delta V \\
\Delta Vsr \leftarrow \mathrm{mean}(\Delta V) \\
\Delta Vsr \\
CDU \leftarrow 100\cdot\left(1 - \dfrac{\Delta Vsr}{Vsr}\right) \\
CDU
\end{array}\right.
\end{aligned}
$$

Рисунок П.14 *О*– Программа расчета равномерности орошения машиной кругового действия

Если в программе *CDUfr3* заменить последнюю команду на *D*, то программа выводит матрицу доз на дугах окружностей. Если последней командой сделать *VD*, то программа выведет дозы на линии *X* после прохода машины. Суммы интенсивностей умножены на время прохождения интервала $\Delta\alpha$. Время $\Delta t$ прохождения интервала $\Delta\alpha$ определяется по формуле

$$\Delta t = \frac{\Delta\alpha}{\omega}, \text{ или } \Delta t = \frac{\Delta\alpha \cdot T \cdot 3600}{2 \cdot \pi},$$

где $\omega$ – угловая скорость трубопровода;

$T$ – продолжительность полного оборота машины в часах.

$\mathrm{CDUfr}(10) = 97.39 \quad j := 0..9 \quad B_j := j + 5 \quad V_j := \mathrm{CDUfr}(B_j)$

$V =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 96.523 |
| 1 | 91.746 |
| 2 | 86.885 |
| 3 | 87.527 |
| 4 | 92.554 |
| 5 | 97.39 |
| 6 | 88.981 |
| 7 | 79.304 |
| 8 | 69.388 |
| 9 | 60.597 |

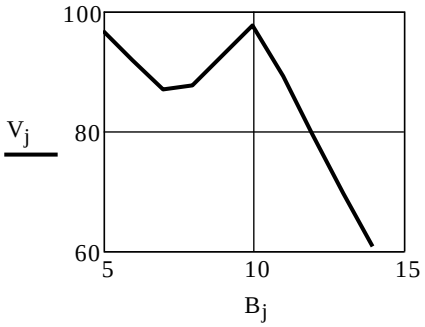



Рисунок П.14 *в* – Вывод результатов счета программой расчета равномерности орошения машиной кругового действия при $R1 = 20$

$j := 0..9 \quad Xo_j := j + 0.5$

$\mathrm{CDUfr2}(10) =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 87.539 |
| 1 | 88.88 |
| 2 | 90.839 |
| 3 | 88.679 |
| 4 | 84.816 |
| 5 | 84.93 |
| 6 | 88.873 |
| 7 | 90.838 |
| 8 | 88.525 |
| 9 | 86.784 |

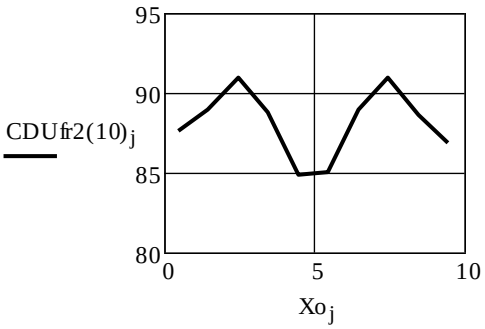



Рисунок П.14 *э* – Вывод результатов счета программой расчета равномерности орошения машиной кругового действия при $R1 = 200$

$j := 0 .. 9$ $VD := CDUfr(10)$ $Xo_j := j + 0.5$

$CDUfr(10) =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 0.232 |
| 1 | 0.231 |
| 2 | 0.232 |
| 3 | 0.225 |
| 4 | 0.217 |
| 5 | 0.221 |
| 6 | 0.233 |
| 7 | 0.237 |
| 8 | 0.228 |
| 9 | 0.221 |

$VD =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 0.232 |
| 1 | 0.231 |
| 2 | 0.232 |
| 3 | 0.225 |
| 4 | 0.217 |
| 5 | 0.221 |
| 6 | 0.233 |
| 7 | 0.237 |
| 8 | 0.228 |
| 9 | 0.221 |

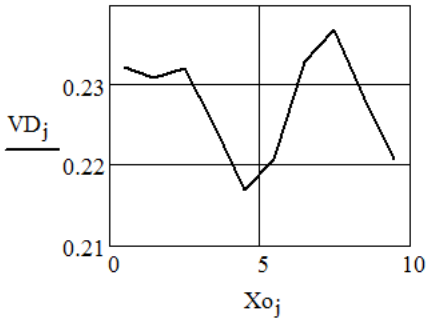



Рисунок П.14 *г* – Вывод результатов счета программой расчета равномерности орошения машиной кругового действия (последняя команда *VD*)

Приложение П

Продолжение программы *Kes(A)*

```
KeS(A) :=
  Q ← 2
  T ← 1000
  B ← A
  I(ρ) ← | I1R ← (0.16 1.59 3.86 6.72 6 4.93 6.09 7.95 8.46 8.09 6.19 4 2.98 1.42 1.11 0.16 0.32)
         | R1 ← (0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16)
         | KSI ← cspline(R1, I1R)
         | r ← 0, 0.5 .. 16
         | A(r) ← interp(KSI, R1, I1R, r)
         | A(ρ)
  for j ∈ 0 .. (A − 1)
    D^⟨j⟩ ← | Y_j ← j + 0.5
            | n ← A − 1
            | for i ∈ 0 .. n
            |   Z_i ← | X_i ← i + 0.5
            |          | ρ1 ← √((X_i)^2 + (Y_j)^2)
            |          | I1 ← | I(ρ1) if ρ1 − 16 < 0
            |          |      | 0 otherwise
            |          | ρ2 ← √((B − X_i)^2 + (Y_j)^2)
            |          | I2 ← | I(ρ2) if ρ2 − 16 < 0
            |          |      | 0 otherwise
            |          | ρ3 ← √((B − X_i)^2 + (A − Y_j)^2)
            |          | I3 ← | I(ρ3) if ρ3 − 16 < 0
            |          |      | 0 otherwise
            |          | ρ4 ← √((X_i)^2 + (A − Y_j)^2)
            |          | I4 ← | I(ρ4) if ρ4 − 16 < 0
            |          |      | 0 otherwise
            |          | Z_i ← I1 + I2 + I3 + I4
            |          | Z_i
            | Z
  D^⟨j⟩ ← Z
  D_i, j
  M ← mean(D)
  M1 ← |D − M|→
  CDU ← 100·(1 − mean(M1)/M)
  KeS_0 ← CDU
  Δn ← M − 0.25·M
  Δv ← M + 0.25·M
  Mid ← min(D)
  Mad ← max(D)
  j ← 0 .. 3
  Int_0 ← 0
  Int_1 ← Δn
  Int_2 ← Δv
  Int_3 ← 2·M
  Int
  n ← hist(Int, D)
  Kef ← n_1 / Σn
  Knd ← n_0 / Σn
  Kiz ← n_2 / Σn
  KeS_1 ← Knd
  KeS_2 ← Kef
  KeS_3 ← Kiz
  KeS
```

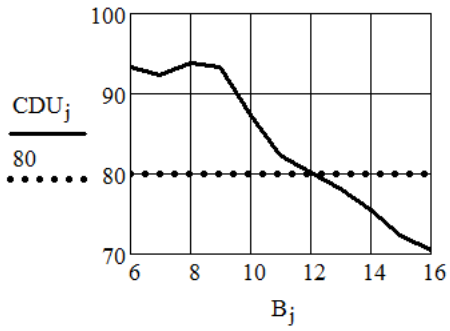
Рисунок П.15 *Ѳ*– Программа расчета показателей эффективности орошения четырьмя стационарными аппаратами, испытанными радиальным методом

$$KeS(15) = \begin{pmatrix} 72.291 \\ 0.231 \\ 0.462 \\ 0.307 \end{pmatrix}$$

$i := 0..3 \quad j := 0..10 \quad B_j := j + 6$

$Kef_j := KeS(B_j)_2 \quad M_{i,j} := KeS(B_j)_i$

$CDU_j := KeS(B_j)_0$



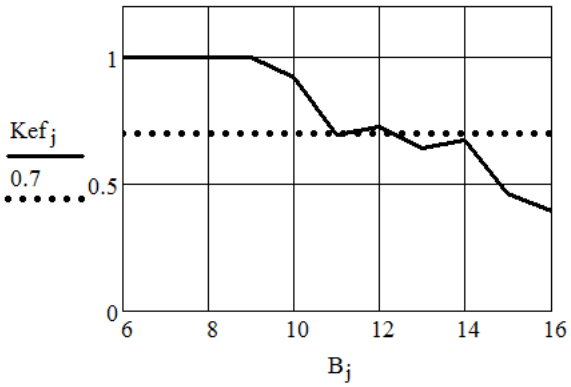




Рисунок П.15 *в* – Вывод результатов счета программой расчета показателей эффективности орошения четырьмя стационарными аппаратами, испытанными радиальным методом

Приложение Р

```
V(B) := | Q ← 2
        | T ← 1000
        | A ← 20
        |                  | 15.24 |
        |                  | 12.28 |
        |                  |  9.74 |
        |                  |  8.04 |
        |                  |  6.77 |
        |                  |  6.77 |
        |                  |  7.62 |
        |                  |  8.04 |
        | I(ρ) ←    IR ←   |  8.47 |
        |                  |  8.04 |
        |                  |  7.83 |
        |                  |  7.20 |
        |                  |  6.77 |
        |                  |  7.20 |
        |                  |  6.77 |
        |                  |  4.23 |
        |                  |  1.24 |
        |                  |  0    |
        |                  |  0.5  |
        |                  |  1.0  |
        |                  |  1.5  |
        |                  |  2.0  |
        |                  |  2.5  |
        |                  |  3.0  |
        |                  |  3.5  |
        |            R ←  |  4.0  |
        |                  |  4.5  |
        |                  |  5.0  |
        |                  |  5.5  |
        |                  |  6.0  |
        |                  |  6.5  |
        |                  |  7.0  |
        |                  |  7.5  |
        |                  |  8.0  |
        | KSI ← cspline(R, IR)
        | r ← 0, 0.25 .. 8
        | A(r) ← interp(KSI, R, IR, r)
        | A(ρ)
```

Продолжение программы

```
for j ∈ 0 .. (A − 1)
 D^⟨j⟩ ← | Y_j ← j + 0.5 − 10
         | n ← B − 1
         | for i ∈ 0 .. n
         |   Z_i ← | X_i ← i + 0.5
         |         | ρ1 ← √((X_i)^2 + (Y_j)^2)
         |         | I1 ← | I(ρ1)  if ρ1 − max(R) < 0
         |         |      | 0      otherwise
         |         | ρ2 ← √((B − X_i)^2 + (Y_j)^2)
         |         | I2 ← | I(ρ2)  if ρ2 − max(R) < 0
         |         |      | 0      otherwise
         |         | ρ3 ← √((X_i + B)^2 + (Y_j)^2)
         |         | I3 ← | I(ρ3)  if ρ3 − max(R) < 0
         |         |      | 0      otherwise
         |         | ρ4 ← √((2·B − X_i)^2 + (Y_j)^2)
         |         | I4 ← | I(ρ4)  if ρ4 − max(R) < 0
         |         |      | 0      otherwise
         |         | Z_i ← I1 + I2 + I3 + I4
         |         | Z_i
         | Z
D^⟨j⟩ ← Z
D_i,j
D1 ← (D)^T
for j ∈ 0 .. (B − 1)
  | V_j ← Σ D1^⟨j⟩
  | V_j
V
j ← 0 .. (B − 1)
Vsr ← mean(V)
Vsr
ΔV ← |V − Vsr|⃗
ΔVsr ← mean(ΔV)
ΔVsr
CDU ← 100·(1 − ΔVsr / Vsr)
CDU
```

Рисунок П.16 *О*– Программа расчета равномерности орошения машиной непрерывного поступательного движения с аппаратами, испытанными радиальным методом

$i := 0 .. 14$ $B_i := i + 10$ $CDU1_i := V(B_i)$ $V(15) = 76.759$

$CDU1 =$

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 84.843 |
| 1 | 89.657 |
| 2 | 93.222 |
| 3 | 91.782 |
| 4 | 84.528 |
| 5 | 76.759 |
| 6 | 68.426 |
| 7 | 61.073 |
| 8 | 54.537 |
| 9 | 48.089 |
| 10 | 41.774 |
| 11 | 36.059 |
| 12 | 30.865 |

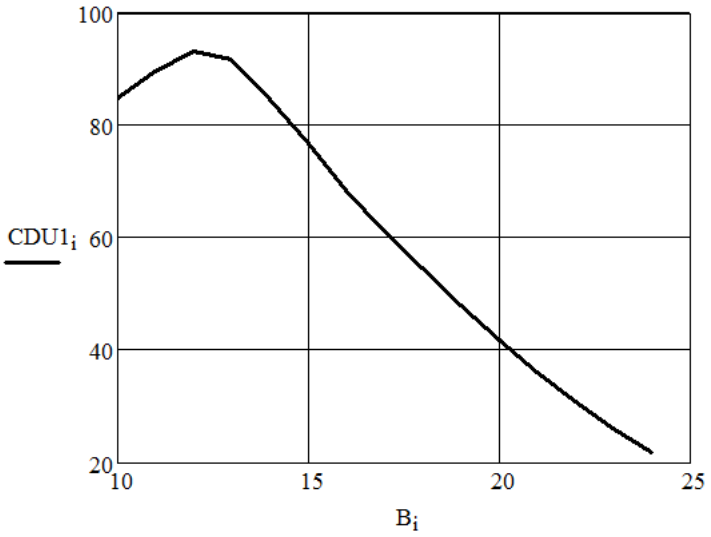



Рисунок П.16 *в* – Вывод результатов счета программой расчета равномерности орошения машиной непрерывного поступательного движения с аппаратами, испытанными радиальным методом

Приложение С

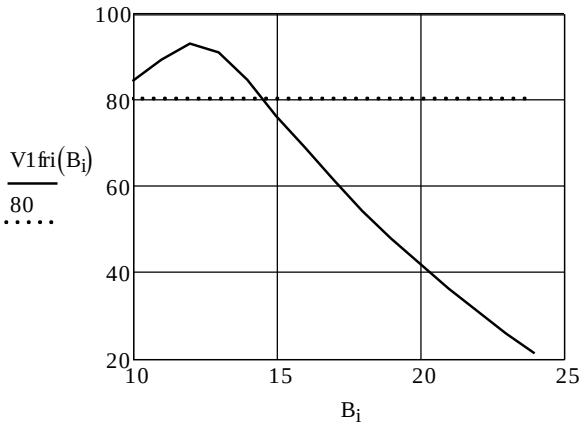
Продолжение программы *V1fri(B)*

```
V1fri(B) := | Q ← 2
            | max(R) ← 8
            | T ← 40
            | I(ρ) ← | IR ← (15.24 12.28 9.74 8.04 6.77 6.77 7.62 8.04 8.47 8.04 7.83 7.20 6.77 7.20 6.77 4.23 1.24)
            |          | R ← (0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0)
            |          | KSI ← cspline(R, IR)
            |          | r ← 0, 0.25 .. 8
            |          | A(r) ← interp(KSI, R, IR, r)
            |          | A(ρ)
```

```
            | n1 ← B − 1
            | for j ∈ 0 .. n1
            |   D^⟨j⟩ ← | Xo_j ← j + 0.5
            |           | Ro1 ← 10
            |           | R1 ← 20
            |           | Q ← 1
            |           | Q1 ← 1.4
            |           | R2 ← 30
            |           | ω ← 2·π / (40·3600)
            |           | αm ← asin(Ro1 / (R1 + Xo_j))
            |           | n ← 50
            |           | for i ∈ 0 .. n
            |           |   Z_i ← | α_i ← −αm + i·2αm/n
            |           |         | X_i ← (R1 + Xo_j)·cos(α_i) − R1
            |           |         | Y_i ← (R1 + Xo_j)·sin(α_i)
            |           |         | ρ1 ← √((X_i)^2 + (Y_i)^2)
            |           |         | I1 ← | I(ρ1)  if ρ1 − max(R) < 0
            |           |         |      | 0      otherwise
            |           |         | ρ2 ← √((B − X_i)^2 + (Y_i)^2)
            |           |         | I2 ← | I(ρ2)  if ρ2 − max(R) < 0
            |           |         |      | 0      otherwise
            |           |         | ρ3 ← √((X_i + B)^2 + (Y_i)^2)
            |           |         | I3 ← | I(ρ3)  if ρ3 − max(R) < 0
            |           |         |      | 0      otherwise
            |           |         | ρ4 ← √((2·B − X_i)^2 + (Y_i)^2)
            |           |         | I4 ← | I(ρ4)  if ρ4 − max(R) < 0
            |           |         |      | 0      otherwise
            |           |         | Z_i ← I1 + I2 + I3 + I4
            |           |         | Z_i
            |           | Z
            | D^⟨j⟩ ← Z
            | D_i,j
            | for j ∈ 0 .. (B − 1)
            |   | V_j ← Σ D^⟨j⟩
            |   | V_j
            | V
            | j ← 0 .. (B − 1)
            | Vsr ← mean(V)
            | Vsr
            | ΔV ← |V − Vsr|  (with arrow)
            | ΔVsr ← mean(ΔV)
            | ΔVsr
            | CDU1 ← 100·(1 − ΔVsr/Vsr)
            | CDU1
V1fri(10) = 84.331
```

Рисунок П.17 *Ѳ*– Программа расчета равномерности орошения машиной кругового действия с аппаратами, испытанными радиальным методом

$i := 0..14 \qquad B_i := i + 10 \qquad CDU_i := V1fri(B_i)$




CDU =

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 84.331 |
| 1 | 89.119 |
| 2 | 92.99 |
| 3 | 90.925 |
| 4 | 84.637 |
| 5 | 76.229 |
| 6 | 68.782 |
| 7 | 61.201 |
| 8 | 54.045 |
| 9 | 47.644 |
| 10 | 41.883 |
| 11 | 36.2 |
| 12 | 30.873 |

Рисунок П.17 *в* – Вывод результатов счета программой расчета равномерности орошения машиной кругового действия с аппаратами, испытанными радиальным методом

V(10) =

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 294.179 |
| 1 | 277.003 |
| 2 | 311.195 |
| 3 | 390.851 |
| 4 | 404.399 |
| 5 | 406.084 |
| 6 | 394.142 |
| 7 | 299.367 |
| 8 | 264.015 |
| 9 | 294.192 |

V(15) =

| | 0 |
|---|---|
| 0 | 294.179 |
| 1 | 277.003 |
| 2 | 275.052 |
| 3 | 271.192 |
| 4 | 244.009 |
| 5 | 202.847 |
| 6 | 156.383 |
| 7 | 88.729 |
| 8 | 122.789 |
| 9 | 165.966 |
| 10 | 209.205 |
| 11 | 240.849 |
| 12 | 254.849 |

$i := 0..19$

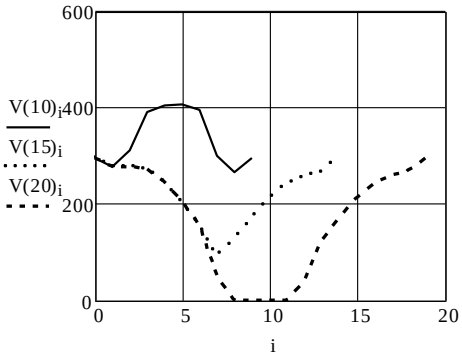



Рисунок П.17 *э* – Вывод результатов счета программой расчета равномерности орошения машиной кругового действия с аппаратами, испытанными радиальным методом (последняя команда *V*)

l Olzuqdksj dqLHOdkfj