

На правах рукописи

ЛЕВШУНОВ ИВАН АЛЕКСАНДРОВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ РЕЖИМОВ ОРОШЕНИЯ
И ПАРАМЕТРОВ ДОЖДЕВАНИЯ СУДАНСКОЙ ТРАВЫ
В УСЛОВИЯХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БЕЛАРУСИ**

Специальность: 4.1.5 – Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре сельскохозяйственных мелиораций ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева».

Научный руководитель: **Дубенок Николай Николаевич**,
доктор сельскохозяйственных наук, профессор,
академик РАН, заведующий кафедрой
сельскохозяйственных мелиораций, лесоводства
и землеустройства ФГБОУ ВО «Российский
государственный аграрный университет – МСХА
имени К.А. Тимирязева»

Официальные оппоненты: **Овчинников Алексей Семенович**
академик РАН, доктор сельскохозяйственных
наук, профессор, Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение высшего
образования «Волгоградский государственный
аграрный университет», профессор кафедры
прикладной геодезии, природообустройства и
водопользования

Дедов Андрей Анатольевич
кандидат сельскохозяйственных наук,
Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение Федеральный научный центр
гидротехники и мелиорации имени А.Н.
Костякова, заведующий научно-
организационным отделом

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
научное учреждение «Волжский научно-
исследовательский институт гидротехники и
мелиорации»

Защита состоится «22» декабря 2026 г. в 11:00 час. на заседании диссертационного совета 35.2.030.07, созданного на базе ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» по адресу: 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, д. 19, учебный корпус №28, аудитория 201, тел./факс: +7(499)976–17–14.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке имени Н.И. Железнова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева» и на сайте Университета <http://www.timacad.ru>.

Автореферат разослан «__» _____ 2026г.

Учёный секретарь
диссертационного совета 35.2.030.07,
кандидат технических наук, доцент

Н.Б. Мартынова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Общая площадь кормовых культур (многолетних и однолетних) в Беларуси составляет около 1,5...2 млн га. Доля однолетних кормовых культур, к которым относится и суданская трава, составляет примерно 30–40 % от общей площади кормовых культур. Площадь под посевами суданской травы часто учитывается в общей категории "однолетние травы на корм" или "прочие кормовые культуры". В последние пять лет наблюдается рост посевов из-за интереса к засухоустойчивым культурам.

Продуктивность сельского хозяйства в Беларуси во многом зависит от природно-климатических условий, что создает риски для продовольственной безопасности. Так, анализ осадков в восточной части Республики Беларусь показывает, что в отдельные периоды времени они могут значительно отклоняться от средних значений. Количественная оценка показателей естественного увлажнения и теплообеспеченности характерных для минеральных почв восточной части Беларуси позволила установить, что в засушливый год повторяемостью один раз в пять лет нехватка осадков будет составлять в среднем 100...200 мм.

В условиях усиления климатической нестабильности (учащение засух, неравномерное распределение осадков) восточные регионы Беларуси, отличающиеся меньшим количеством осадков по сравнению с западными, становятся зоной повышенного риска для растениеводства. Суданская трава, как засухоустойчивая культура, обладает потенциалом для адаптации. Это требует внедрения управляемого орошения. Поэтому при таких условиях получение устойчивых урожаев однолетних культур, возделываемых на зелёный корм, в том числе и суданской травы, трудновыполнимо без применения оросительных мелиораций и изучения её водного режима при орошении, что и подчеркивает актуальность выбранной темы исследований.

Степень разработанности темы. Разработкой режимов орошения сельскохозяйственных культур занимались такие ученые как: А.М. Алпатыев, Ю.Г. Безбородов, В.В. Бородычев, В.И. Вихров, А.И. Голованов, М.Г. Голченко, Д.П. Гостищев, Н.Н. Дубенок, Л.А. Журавлёва, С.Д. Исаева, Н.П. Карпенко, Л.В. Кирейчева, И.П. Кружилин, Т.Д. Лагун, Г.В. Латушкина, А.П. Лихацевич, Ю.А. Мажайский, В.П. Максименко, В.С. Мезенцев, А.И. Михальцевич, В.И. Невдах, А.С. Овчинников, Г.В. Ольгаренко, В.В. Пчёлкин, Е.А. Стельмах, Ю.И. Сухарев, С.И. Харченко, М.Ю. Храбров, В.В. Шабанов, О.А. Шавлинский, Б.Б. Шумаков и другие известные ученые.

Формулы, позволяющие вычислить величину водопотребления сельскохозяйственных культур, разработаны учеными: А.М. Алпатыев, С.М.

Алпатыев, М.И. Будыко, В.И. Вихров, М.Г. Голченко, Н.В. Данильченко, Н.Н. Дубенок, Н.Н. Иванов, А.Р. Константинов, А.Н. Костяков, А.П. Лихацевич, Г.К. Льгов, В.С. Мезенцев, С.П. Невский, С.И. Харченко, И.А. Шаров, Д.А. Штойко, и др. Формулы, вышеуказанных авторов в основном применимы с биоклиматическими коэффициентами, позволяющими учесть биологические особенности возделываемой культуры, а также специфику рассматриваемой гидрологоклиматической зоны. Помимо того, при применении существующих биоклиматических коэффициентов для других природно-климатических условий требуется значительная корректировка их величин. По причине отсутствия биоклиматических коэффициентов водопотребления суданской травы, возделываемой на дерново-подзолистых суглинистых почвах в условиях восточной части Беларуси необходимо выполнить их расчет, а также вывести формулу для определения величины водопотребления для исследуемой гидрологоклиматической зоны.

Цели и задачи исследования. Цель работы – разработка и обоснование оптимальных режимов орошения и параметров дождевания суданской травы, возделываемой на зелёную массу на дерново-подзолистых суглинистых почвах восточной части Беларуси.

Задачи исследования:

1. Изучить требования суданской травы к водному режиму почвы.
2. Определить водопотребление суданской травы, а также установить биоклиматические коэффициенты водопотребления в условиях восточной части Беларуси.
3. Определить величину поверхностного стока на посевах суданской травы при дождевании в зависимости от поливных норм и интенсивности искусственного дождя от площади листовой поверхности культуры.
4. Разработать конструкцию дождеобразующего устройства, удовлетворяющим основным показателям качества искусственного дождя.
5. Экспериментально исследовать основные показатели качества искусственного дождя разработанного дождевального устройства.
6. Определить экономическую и энергетическую эффективность орошения дождеванием суданской травы.

Научная новизна. Установлены фактические параметры водопотребления суданской травы при орошении дождеванием на дерново-подзолистых суглинистых почвах восточной части Беларуси. Получены зональные биоклиматические коэффициенты водопотребления суданской травы по декадам вегетационного периода в зависимости от режима увлажнения. Выявлены закономерности формирования поверхностного стока на посевах суданской травы при дождевании. Количественно оценено совместное влияние

интенсивности дождя, уклона поверхности и площади листовой поверхности растений на величину стока.

Разработана конструкция дождевальной насадки и обоснованы её оптимальные режимы работы, обеспечивающие эрозионно-безопасный и равномерный полив. На основе экономической и энергетической оценки доказана высокая эффективность возделывания суданской травы на зеленую массу с применением орошения в условиях восточной части Беларуси.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в установлении расчетно-экспериментальных величин биоклиматических коэффициентов, наиболее полно учитывающих гидролого-климатические показатели восточной части Беларуси проведения исследований, предложены уравнения регрессии и дана оценка изменчивости водопотребления данной культуры с применением расчетных формул. Практическая значимость работы состоит в разработке конкретных режимов орошения суданской травы с различными порогами предполивной влажности почвы, их параметров и характеристик в условиях восточной части Республики Беларусь, повышение эффективности дождевания легкосуглинистых почв путём разработки дождевального насадка.

Положения, выносимые на защиту:

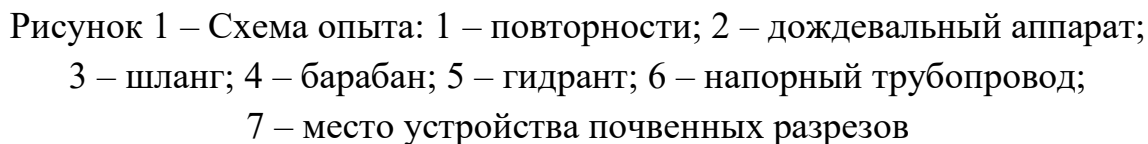
1. Режим орошения суданской травы, включающий зональные биоклиматические коэффициенты и регрессионные модели, позволяющие прогнозировать суммарное водопотребление культуры и обосновывать поддержание предполивной влажности почвы на уровне 70-80 % НВ.

2. Закономерности формирования поверхностного стока при природоподобных технологиях орошения, устанавливающие количественную зависимость величины стока от интенсивности дождя, уклона участка и площади листовой поверхности суданской травы.

3. Конструкция дождевального насадка, обеспечивающая интенсивность искусственного дождя, не превышающую скорость впитывания почвы, и формирующая преимущественно мелкодисперсный дождь с высокими показателями равномерности распределения.

4. Экономическая и энергетическая эффективность возделывания суданской травы на зеленую массу при орошении дождеванием в условиях восточной части Беларуси, обосновывающая целесообразность применения режима орошения с поддержанием влажности в активном слое почвы 70-80 % НВ как наиболее рационального с позиций окупаемости затрат.

Схема опыта и методы исследования. Схема опыта представлена на рисунке 1.



Методы исследования базируются на системном подходе, фундаментальных положениях мелиоративной и агрономической науки. При проведении исследований использованы «Методика полевого опыта с основами статистической обработки результатов исследований» Б.А. Доспехова, Влажность почвы определялась термостатно-весовым способом (ГОСТ 28268-89), наименьшая влагоёмкость – способом заливаемых площадок (РД 52.33.219-2022, плотность почвы – методом режущего кольца (ГОСТ 3180-2015), гранулометрический состав - определялся в лабораторных условиях (ГОСТ 12536-2014), поверхностный сток – объёмным способом, по приращению уровня воды в мерном баке, урожайность зелёной массы – способом сплошного скашивания, площадь листовой поверхности – расчётным методом основанным на линейных параметрах листа, показатель свободного (безнапорного) впитывания – с помощью малой дождевальной установки, расход воды дождевального насадка определяли объёмным способом, крупность капель дождя с помощью бумажных фильтров, равномерность полива дефлекторной насадки оценивалась по распределению слоя дождя по площади полива при помощи дождемеров (ГОСТ ИСО 7749-2–2004).

Степень достоверности и апробация результатов. Полученные результаты исследований обоснованы большим объемом экспериментальных данных с применением апробированных методик и лабораторного оборудования. Достоверность полученных результатов исследований подтверждена посредством применения современных методов математической статистики.

Результаты исследований были апробированы на научных мероприятиях: международной научно-технической конференции «Исследования и последние достижения в АПК и биотехнологиях» AVR-2021, Краснодар 24-26 мая 2021 г; международной научно-практической конференции «Актуальные научно-технические экологические проблемы мелиорации земель», Горки 20-21 апреля 2023 г; международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 150-летию со дня рождения Миловича Александра Яковлевича, Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 3-5 июня 2024 г; международной научно-практической Интернет-конференции «Мелиорация: история и современность», посвящённой 80-й годовщине Победы в Великой Отечественной войне 1941-1945 годов, Москва, ФГБНУ «ФНЦ ВНИИГиМ им. А.Н. Костякова», 15 апреля 2025 г; международной научной конференции молодых учёных и специалистов, посвящённой 160-летию Тимирязевской академии, Москва, РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, 2-4 июня 2025 г; международной научной конференции «Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки», ФГБУН «Научно-исследовательский институт сельского хозяйства Крыма», 8-12 сентября 2025 г.; международной научно-практической конференции, посвящённой памяти члена-корреспондента РАСХН и НАН КР академика МАЭП и РАВН Бочкарёва Я.В. 9-10 декабря 2025 г.

Личный вклад соискателя. Автором проведён системный анализ литературных источников, сформулирована цель и конкретные задачи исследования. Проведена организация экспериментального участка, выполнены полевые опыты (3-летний цикл). Выполнена статистическая обработка результатов, проведено теоретическое исследование различных конструкций дождевателей, предложена модернизация конструкции дождевального насадка. Выполнена формулировка выводов и производственных рекомендаций, выполнена апробация на конференциях (включая международные), произведена подготовка и публикация научных статей.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 научных работ, в том числе: 4 статьи в рекомендованных журналах ВАК РФ, 11 публикаций в других научных изданиях, сборниках научных трудов, материалов конференций, 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертационное исследование включает введение, шесть глав основной части, заключение и список использованных источников. Общий объем работы составляет 236 страницы печатного текста, включая 35 иллюстрации, 36 таблиц, 18 приложений, 201 литературный источник.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе на основе анализа литературных источников рассмотрены биологические особенности, агротехника возделывания, требования к водному режиму и опыт орошения суданской травы, а также состояние изученности поверхностного стока при искусственном дождевании. Охарактеризованы биологические особенности и агротехника суданской травы. Установлено, что данная культура сочетает засухоустойчивость с высокой отзывчивостью на увлажнение и минеральное питание. Критическим фактором для получения всходов является температура почвы (оптимальная для прорастания семян – 20...30 °С, минимальная для посева – 10...14 °С). Посев в непрогретую почву приводит к резкому снижению урожайности. Приведены рекомендуемые дозы удобрений для дерново-подзолистых почв, лучшие предшественники (озимые, яровые зерновые, зернобобовые), а также сорта, включённые в Государственный реестр Республики Беларусь (Синельниковская, Сенокосная 88, Сочностебельная 18, Пружанская). Проанализированы требования суданской травы к водному режиму и обобщён опыт орошения. Показано, что основная масса корней (до 85 %) сосредоточена в слое почвы 0...0,7 м. Для получения зелёной массы 50...60 т/га необходимо поддерживать влажность почвы не ниже 70 % НВ, а для урожаев 70...80 т/га – не ниже 75...80 % НВ на фоне повышенных доз удобрений. Отмечено, что для условий Беларуси целенаправленные исследования режимов орошения суданской травы отсутствуют, что определяет актуальность их проведения. Рассмотрено состояние изученности поверхностного стока при искусственном дождевании. Установлено, что возникновение стока определяется соотношением интенсивности дождя и водопроницаемости почвы. Основными влияющими факторами являются: предполивная влажность, уклон участка, интенсивность дождевания, агрофон и наличие растительного покрова. Приведены расчётные зависимости Н.Н. Дубенка для прогнозирования слоя и скорости стока. Обосновано, что, несмотря на наличие обширных данных о биологии и агротехнике суданской травы, для условий Республики Беларусь остаются недостаточно изученными оптимальные режимы орошения, водопотребление культуры и количественные параметры

поверхностного стока при дождевании, что определяет необходимость проведения собственных полевых исследований.

Во второй главе охарактеризованы природно-климатические условия восточной части Беларуси, описаны место проведения экспериментов, схема опыта, методики наблюдений и расчётов, а также метеорологические условия вегетационных периодов 2020–2022 гг.

Рассмотрены природно-климатические условия восточной части Беларуси (Оршанско-Могилёвская равнина). Дана характеристика опытного участка, расположенного на базе УО БГСХА, Горецкого района Могилёвской области. Почва – дерново-подзолистая легкосуглинистая почва слабо оподзоленная на лёгком моренном суглинке. Агрохимические показатели пахотного слоя ($pH = 5,29$; $P_2O_5 = 355$ мг/кг; $K_2O = 331$ мг/кг; гумус = 1,68 %) соответствуют требованиям для возделывания суданской травы. Определены водно-физические свойства: наименьшая влагоёмкость в слое 0...40 см – 21,8...23,8 % от массы сухой почвы, плотность сложения – 1,26...1,40 г/см³. Грунтовые воды залегают глубже 5 м, что исключает их влияние на водный режим.

Исследования проводились в 2020–2022 гг. с использованием общепринятых методик (Б.А. Доспехов, А.Н. Костяков, Н.Н. Дубенок, Г.П. Сурмач и др.). Схема опыта включала три варианта: без орошения (контроль), поддержание влажности не ниже 70...80 % НВ и 80...90 % НВ в активном слое почвы.

Фон минеральных удобрений – $N_{60}P_{60}K_{100}$. Возделывался сорт «Пружанская», «Сенокосная 88». Орошение проводилось дальнеструйным дождевателем SR-140 (установка Bauer Rainstar T-61).

Проанализированы метеорологические условия вегетационных периодов 2020–2022 гг. Установлено, что погодные условия характеризовались неравномерным распределением осадков как по годам, так и внутри сезонов.

Выполнена оценка обеспеченности лет исследований на основе 50-летнего ряда метеонаблюдений (рисунок 2).

По разности «осадки – испарение» 2020 год охарактеризован как средневлажный (31,2 %), 2021 – средний (53,0 %), 2022 – среднесухой (70,8 %). Таким образом, период исследований охватил три контрастных по влагообеспеченности типа лет, что повышает достоверность полученных результатов.

Обосновано, что выбранные объект, методика и метеоусловия обеспечили получение репрезентативных экспериментальных данных, пригодных для разработки оптимальных режимов орошения суданской травы в восточной части Беларуси.

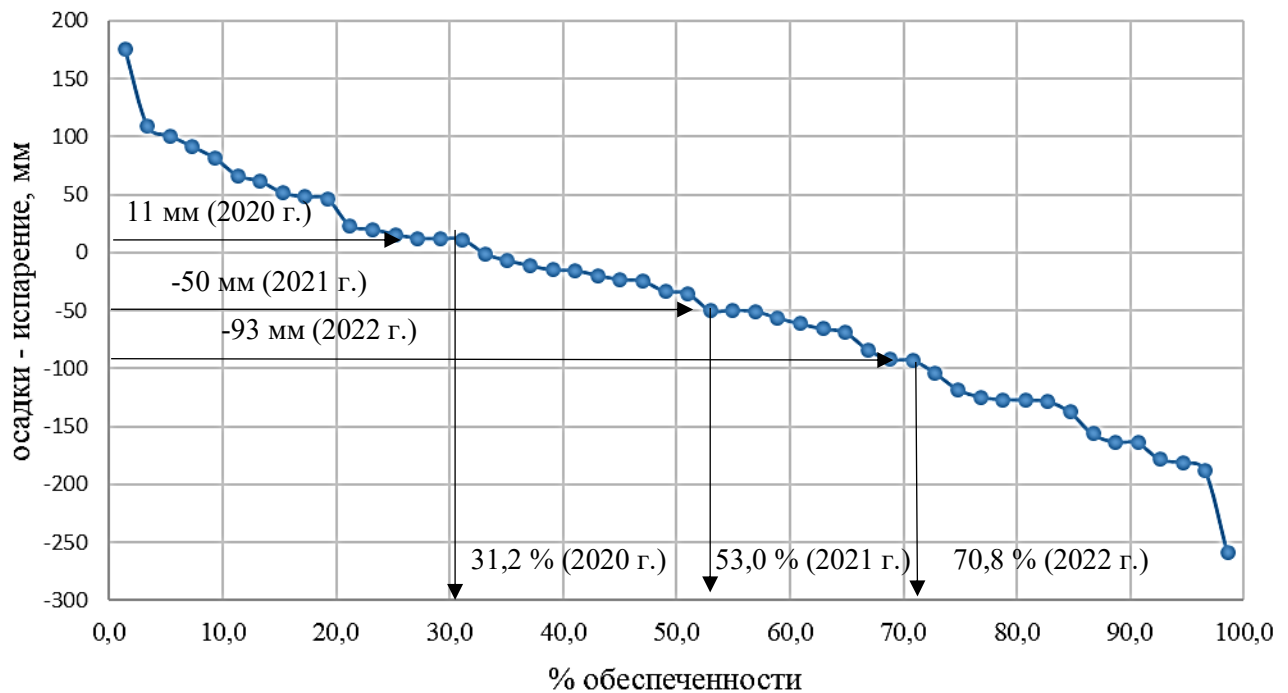


Рисунок 2 – Кривая обеспеченности по разности между осадками и испарением за период с мая по сентябрь по агрометеорологической станции Горки с 1973 по 2022 гг.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению суммарного водопотребления суданской травы, установлению зональных биоклиматических коэффициентов, обоснованию расчётного слоя почвы и пределов оптимальной влажности, а также анализу динамики влажности почвы, сроков и норм поливов в зависимости от режима орошения. Определено суммарное водопотребление суданской травы (E) за вегетационный период (май–сентябрь) методом водного баланса:

$$E = W_n - W_k + P + M - C \quad (1)$$

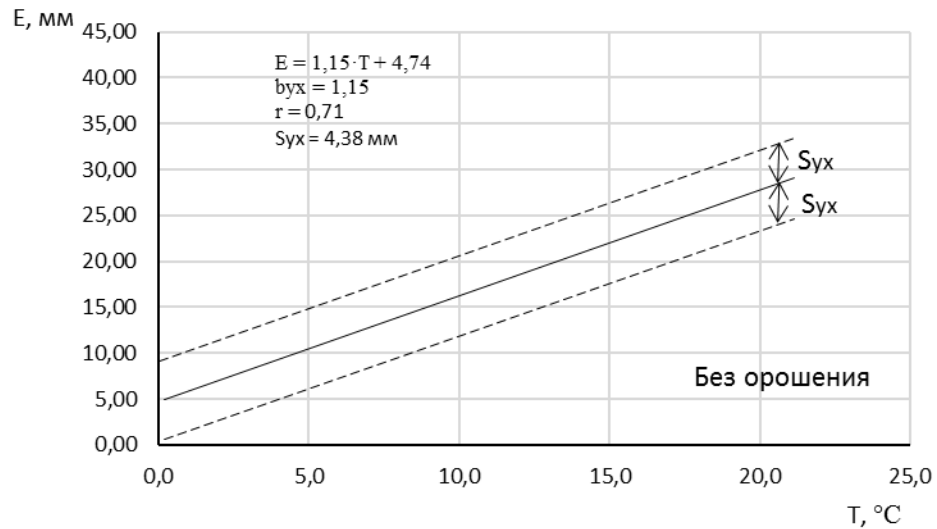
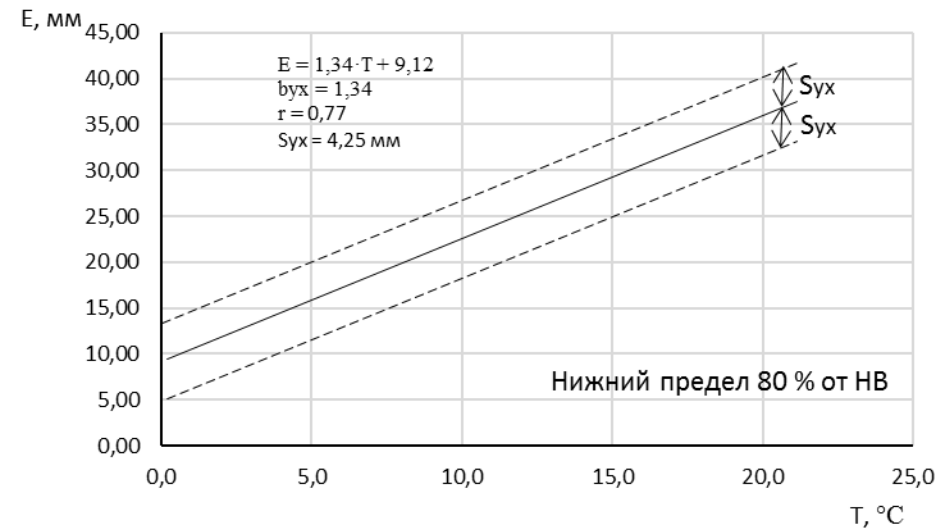
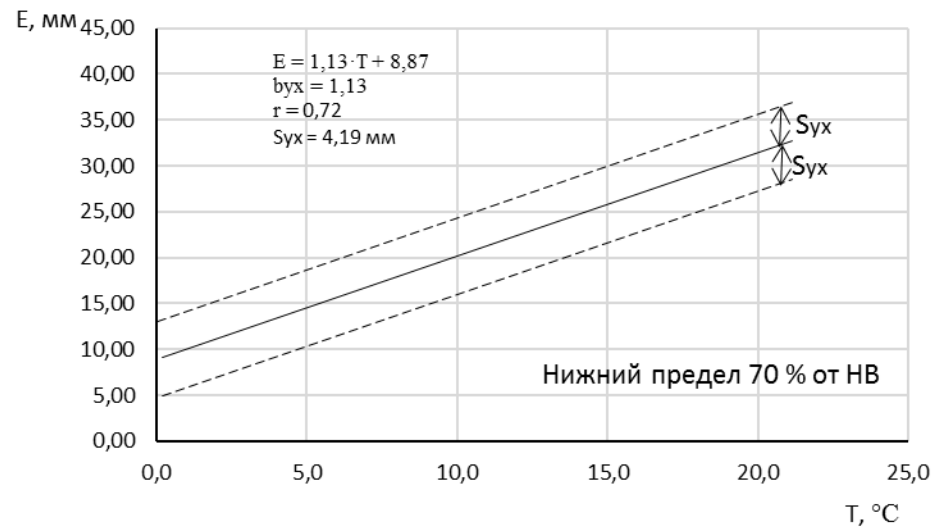
где W_n , W_k – влажность почвы соответственно в начале и в конце расчётного периода, мм (определялась термостатно-весовым способом);

P – количество атмосферных осадков за расчётный период, мм;

M – оросительная норма, мм;

C – потери воды на поверхностный сток, мм.

Установлено, что водопотребление составило: на неорошаемом фоне – 316,4...359,7 мм; при поддержании нижнего порога влажности 70 % НВ – 394,3...417,6 мм; при пороге 80 % НВ – 442,6...476,7 мм. Максимальное декадное водопотребление наблюдалось в фазы активного роста и вымётывания метёлки (июнь–июль). Получены уравнения регрессии для варианта без орошения, 70 % НВ и 80 % НВ (рисунок 3).



$b_{yx} = 1,13 \dots 1,34$ – коэффициент регрессии
 $r = 0,71 \dots 0,77$ – коэффициент корреляции
 $S_{yx} = 4,19 \dots 4,38$ – ошибка отклонения от регрессии
 $S_r = 0,18 \dots 0,20$ – ошибка коэффициента корреляции

Рисунок 3 – Теоретические линии регрессии при прямолинейной корреляции между среднесуточной температурой воздуха (Т) и суммарным водопотреблением за декаду (Е) для вариантов

$$E_k = 1,15 \cdot T + 4,74 \quad (2)$$

$$E_{70\% \text{ НВ}} = 1,13 \cdot T + 8,87 \quad (3)$$

$$E_{80\% \text{ НВ}} = 1,34 \cdot T + 9,12 \quad (4)$$

где E_k – суммарное водопотребление за декаду на контрольном варианте, мм;

T – среднесуточная температура воздуха за декаду, °С.

Данные уравнения связывают суммарное декадное водопотребление со среднесуточной температурой воздуха для каждого варианта опыта (коэффициенты корреляции $r = 0,71 \dots 0,77$).

Отклонение расчётных значений от фактических составило 4,0...10,6 %, (таблица 1), что подтверждает адекватность моделей.

Таблица 1 – Фактическое и расчётное суммарное водопотребление суданской травой за май-сентябрь месяцы, мм

Годы исследований	Варианты	Водопотребление, мм		Отклонение расчётного от фактического, %
		Фактическое	По уравнениям	
2020	Без орошения	359,7	321,4	10,6
	70 % НВ	394,3	374,8	4,9
	80 % НВ	442,6	424,9	4,0
2021	Без орошения	353,0	336,4	4,7
	70 % НВ	409,1	389,5	4,8
	80 % НВ	476,7	442,3	7,2
2022	Без орошения	316,4	332,8	4,9
	70 % НВ	417,6	386,0	7,6
	80 % НВ	456,3	438,2	4,0

Примечание: для 2020 г. НСР_{0,5%} = 4,9; средняя ошибка опыта 2,8. В 2021 г. НСР_{0,5%} = 3,8; средняя ошибка опыта 2,1. Для 2022 г. НСР_{0,5%} = 5,6 средняя ошибка опыта 3,1.

Впервые для условий восточной части Беларуси определены биоклиматические коэффициенты (K_6) суданской травы (таблица 2).

Таблица 2 – Коэффициенты осреднённой биологической кривой для суданской травы при укосном использовании для восточной части Беларуси

Варианты	Май			Июнь			Июль			Август			Сентябрь		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Без орошения		0,21	0,30	0,38	0,42	0,45	0,47	0,48	0,49 (0,35)	0,40	0,46	0,51	0,54	0,55	0,52
70 % НВ		0,23	0,32	0,39	0,45	0,47	0,50	0,52	0,53 (0,38)	0,46	0,52	0,56	0,58	0,59	0,57
80 % НВ		0,22	0,31	0,42	0,46	0,50	0,54	0,56	0,58 (0,42)	0,50	0,59	0,64	0,68	0,70	0,69

Примечание: НСР_{0,5%} = 3,4 средняя ошибка опыта 1,8.

Средние значения K_6 изменяются по декадам в диапазоне 0,21...0,70 мм/мб в зависимости от варианта орошения и фазы развития культуры.

Установлено, что динамика биоклиматического коэффициента чётко коррелирует с укосами: снижение K_6 наблюдается после скашивания, что отражает уменьшение транспирационной активности растений.

На основе литературных данных обоснован выбор расчётного слоя почвы (0...40 см) для суданской травы. В качестве нижних порогов предполивной влажности приняты уровни 70 % и 80 % НВ, что соответствует рекомендациям А.Н. Костякова о достаточном содержании воздуха в почве (15...20 % порозности).

По опытным данным, был построен график связи урожайности суданской травы с влажностью почвы, характеризующий связь урожайности в расчётном слое за период вегетации культуры (рисунок 4).

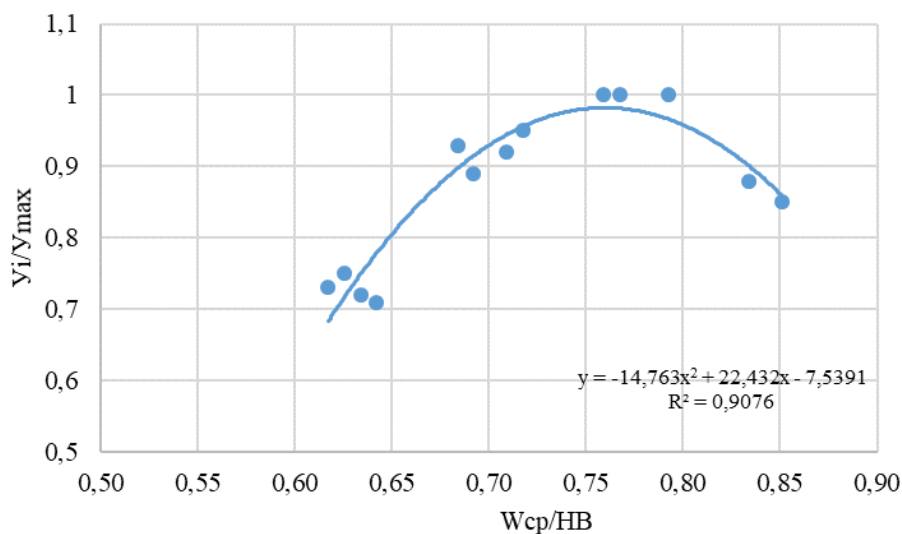


Рисунок 4 – Изменение относительной урожайности суданской травы от увлажнённости почвы

Анализ графика на рисунке 4 показывает, что наилучшее значение влажности почвы составляет 76 % НВ.

Проанализирована динамика влажности почвы за три года исследований (рисунок 5). На неорошаемом фоне влажность в слое 0...40 см снижалась до 52...62 % НВ в засушливые периоды (июль–август). Поддержание порога 70...80 % НВ потребовало 1...2 поливов за сезон оросительной нормой 35...72 мм; поддержание порога 80...90 % НВ – 2...4 поливов оросительной нормой 48...88 мм.

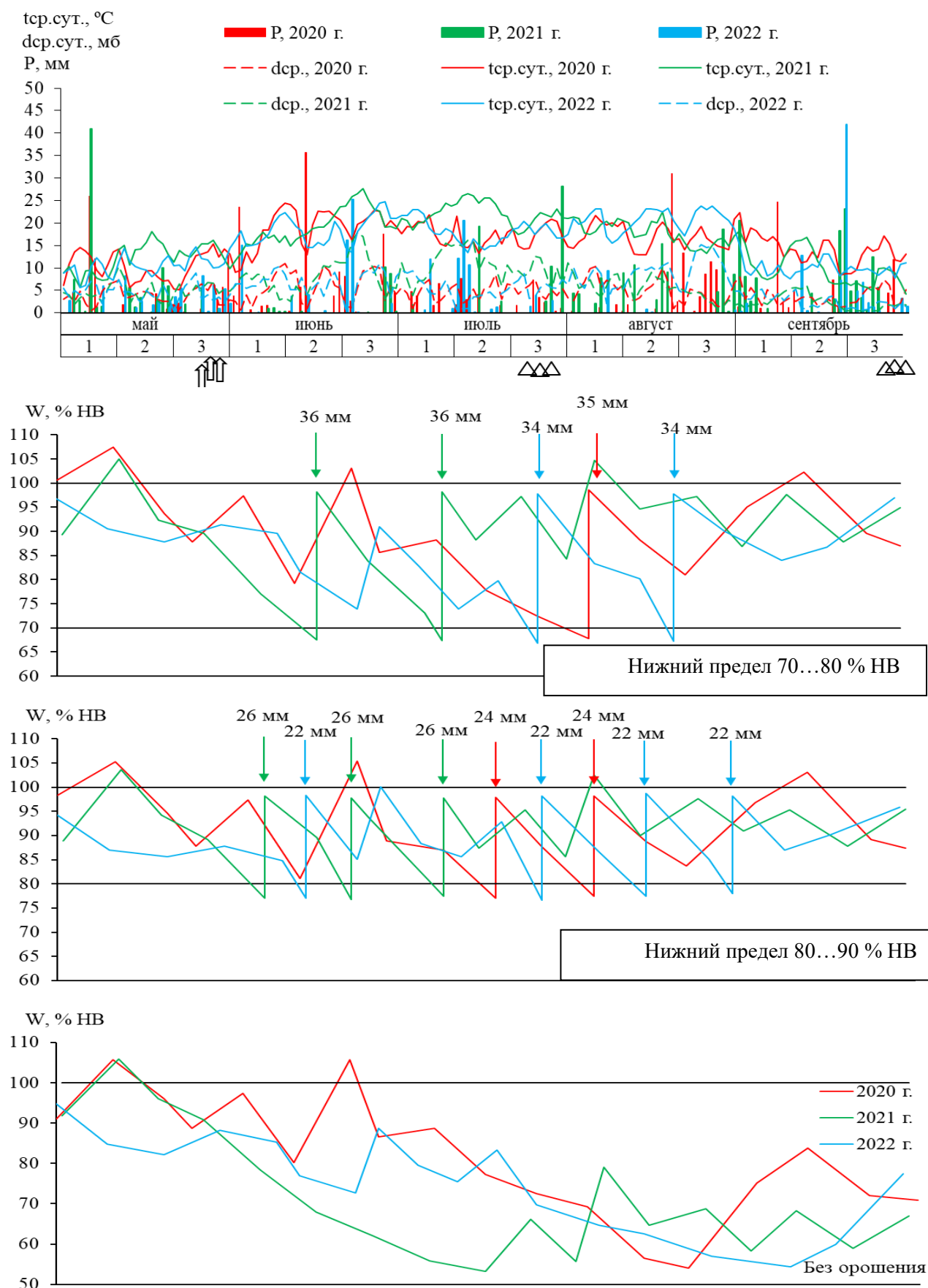


Рисунок 5 – Изменение средней влажности почвы в активном слое почвы суданской травы и климатических показателей в вариантах опыта в 2020...2022 гг.

Поливные нормы составили 34...36 мм (при пороге 70...80 % НВ) и 22...26 мм (при пороге 80...90 % НВ).

Обобщены основные закономерности водопотребления и режима орошения суданской травы, получены регрессионные зависимости и биоклиматические коэффициенты. Рекомендовано использование порога 70 % НВ в годы со средней и повышенной влагообеспеченностью, а порога 80 % НВ – в засушливые годы.

В четвёртой главе представлены результаты экспериментальных исследований влияния интенсивности дождя, поливной нормы, уклона поверхности и площади листовой поверхности суданской травы на формирование поверхностного стока, а также изучена впитывающая способность почвы опытного участка при дождевании.

На стоковых площадках размером 2×5 м изучена зависимость поверхностного стока от интенсивности дождя, поливной нормы, уклона и площади листовой поверхности суданской травы (рисунок 6).

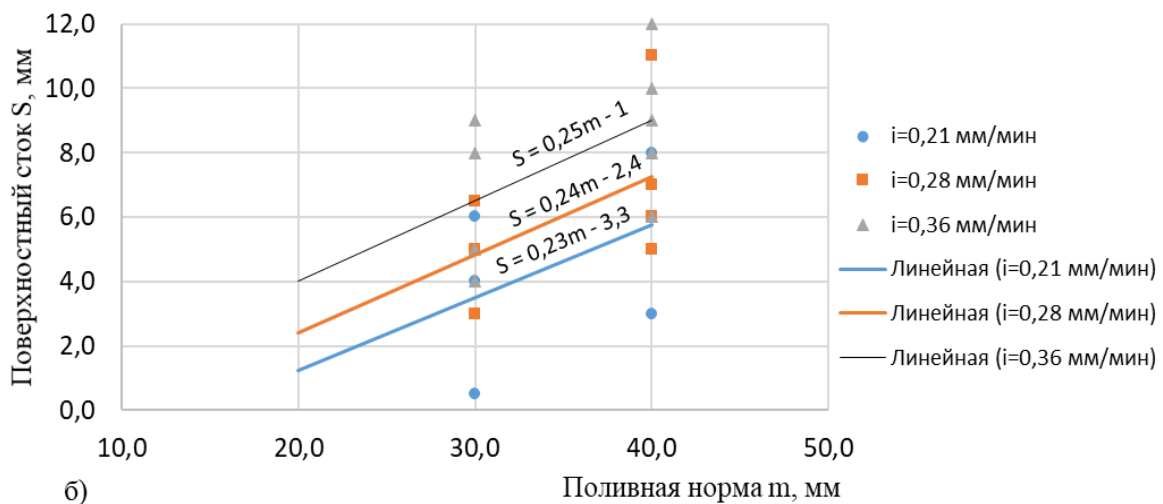
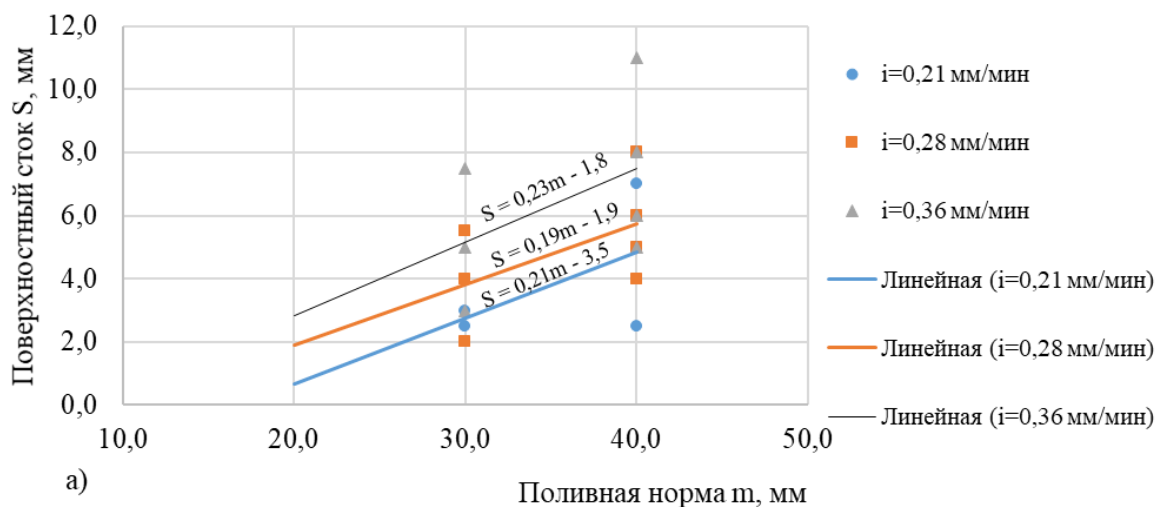


Рисунок 6 – Величина поверхностного стока в зависимости от поливных норм, интенсивности дождя, уклона поверхности: а). уклон 0,003; б). уклон 0,006.

Установлено, что при увеличении интенсивности дождя с 0,21 до 0,36 мм/мин (поливная норма 30 мм, уклон 0,003) величина поверхностного стока возрастает. При увеличении поливной нормы с 30 до 40 мм (интенсивность 0,36 мм/мин, уклон 0,003) сток увеличивается с 8 до 11 мм. Увеличение уклона с 0,003 до 0,006 приводит к росту стока в среднем на 1,5...2,5 мм. Впервые для суданской травы количественно оценено влияние листового аппарата: при площади листовой поверхности более 130 см² (фаза вымётывания) поверхностный сток практически отсутствует (0...2 мм), тогда как при площади 25...60 см² (начальные фазы роста) сток максимален.

С использованием малой дождевальной установки (площадь 0,5 м², высота 1,5 м) определена впитывающая способность почвы. Показатель свободного впитывания (достоковая норма при интенсивности 1 мм/мин) составил: при уклоне 0,003 – 19 мм (с рыхлением) и 13 мм (без рыхления); при уклоне 0,006 – 12 мм (с рыхлением) и 8 мм (без рыхления). Скорость впитывания к концу 20-й минуты снизилась до 0,38...0,62 мм/мин, к концу 60-й минуты стабилизировалась на уровне 0,22...0,25 мм/мин. Продолжительность до начала стока при интенсивности 1 мм/мин составила: при уклоне 0,003 – 13 мин (без рыхления) и 19 мин (с рыхлением); при уклоне 0,006 – 8 мин (без рыхления) и 12 мин (с рыхлением). При увеличении интенсивности до 2 мм/мин время до начала стока сокращается до 5 мин.

Обобщены основные закономерности формирования поверхностного стока при дождевании суданской травы. Для минимизации стока рекомендовано: применять поливные нормы не более 30 мм на склонах более 0,006; использовать насадки с интенсивностью 0,21...0,28 мм/мин; проводить поливы в фазы с развитой листовой поверхностью (площадь листьев > 60 см²).

Представленные сведения и анализ данных других авторов показали несоответствие интенсивности искусственного дождя (0,25...0,35 мм/мин) создаваемого дальнеструйным дождевателем SR-140 (установка Bauer Rainstar T-61), диаметром капли от 0,1 до 2,3 мм и установившейся скоростей впитывания воды почвой (0,22...0,25 мм/мин), что послужило причиной появления поверхностного стока на опытном участке, а также частичным полеганием посевов суданской травы при работе дальнеструйного дождевателя, особенно в начальной стадии роста культуры. Это явилось основанием для разработки дождеобразующего устройства, обеспечивающего интенсивность искусственного дождя, не превышающую скорость впитывания почвы, и формирующим преимущественно мелкодисперсный дождь с высокими показателями равномерности распределения.

В пятой главе представлены результаты аналитического обзора существующих дождеобразующих устройств, описана разработанная

конструкция дождевальной насадки, приведены методики и результаты лабораторных и полевых испытаний по определению её основных показателей качества искусственного дождя. Описана разработанная конструкция дождевальной насадки (патент № 2852370).

Приведены методики определения основных показателей качества искусственного дождя: интенсивности, диаметра капель (методом бумажных фильтров), равномерности распределения (коэффициент Христиансена). Лабораторные и полевые исследования проводились на базе УО БГСХА.

Представлены результаты исследования разработанной насадки. Установлено, что расход воды составляет от 0,96 до 3,92 л/с в зависимости от диаметра сопла (10, 12, 16 мм) и напора (0,10...0,40 МПа), рисунок 7.

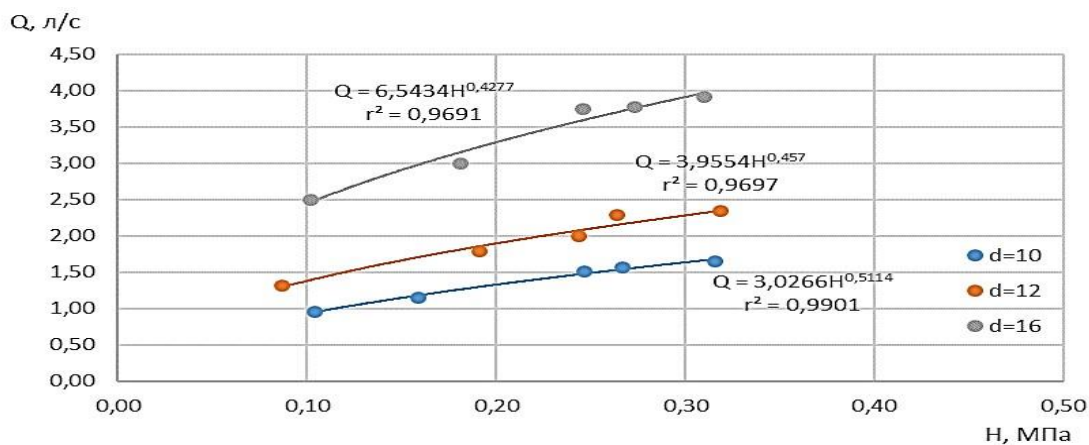


Рисунок 7 – Расходно-напорная характеристика дефлекторной насадки

Определён средний коэффициент расхода $\mu = 0,842$, что свидетельствует о невысоких гидравлических потерях. Насадка с углом конуса 120° (вариант 3) обеспечивает интенсивность дождя, не превышающую скорость впитывания почвы, рисунок 8.

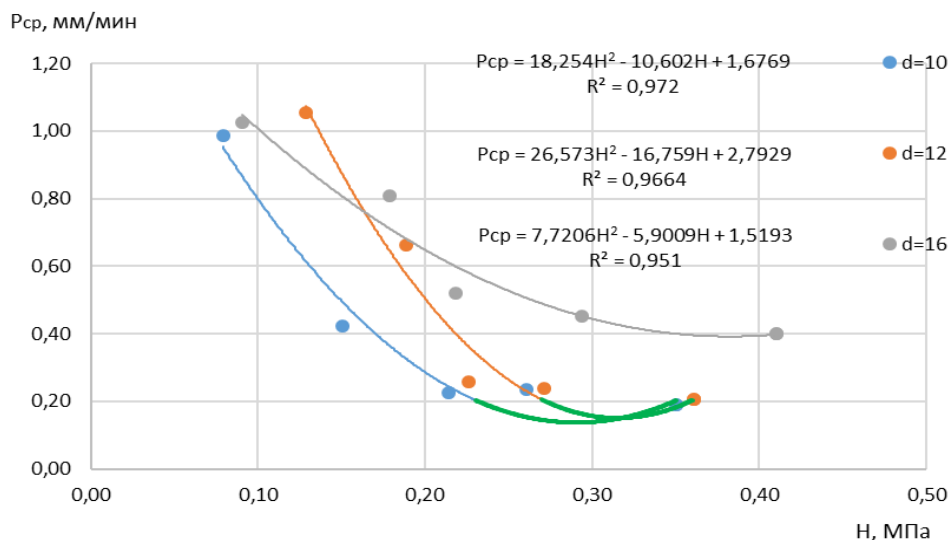


Рисунок 8 – Аппроксимация средней интенсивности дождя насадки с углом вершины конуса дефлектора 120° при высоте установки 2,0 м

Рекомендованы режимы работы: диаметр сопла 10 мм, напор 0,22...0,33 МПа (радиус полива 11...13 м) и диаметр сопла 12 мм, напор 0,27...0,35 МПа (радиус полива 12...15 м) при высоте установки 2,0 м.

Средний диаметр капель дождя (d_{cp}) вдоль радиуса полива дефлекторной насадкой с углом вершины конуса дефлектора 120° при высоте установки 2,0 м в зависимости от диаметра сопла (D) и напора (H) варьируется от 0,54 до 1,26 мм. (рисунок 9).

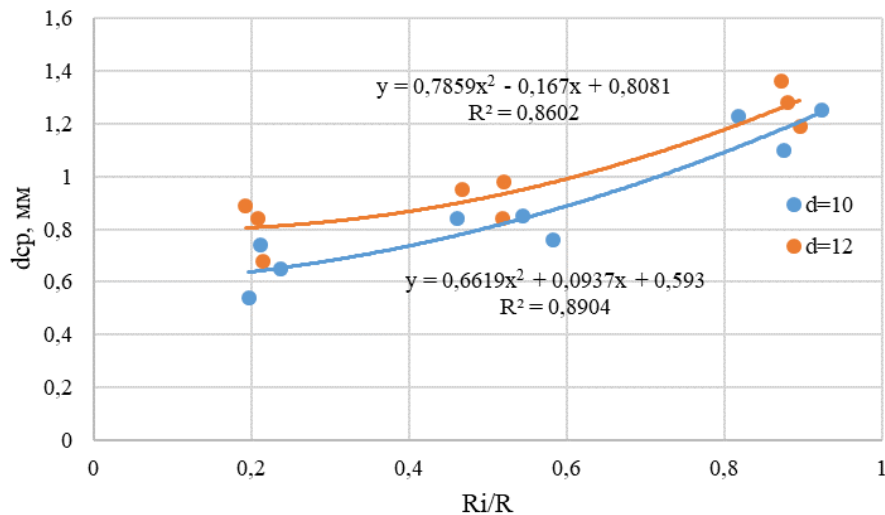


Рисунок 9 – Изменение среднего диаметра капель вдоль относительного радиуса полива насадки с углом вершины конуса дефлектора 120° при высоте установки 2,0 м

Коэффициент равномерности полива по Христиансену достигает максимальных значений ($\sigma > 80\%$) при давлении 0,24...0,31 МПа (сопло 10 мм) и 0,25...0,35 МПа (сопло 12 мм), рисунок 10.

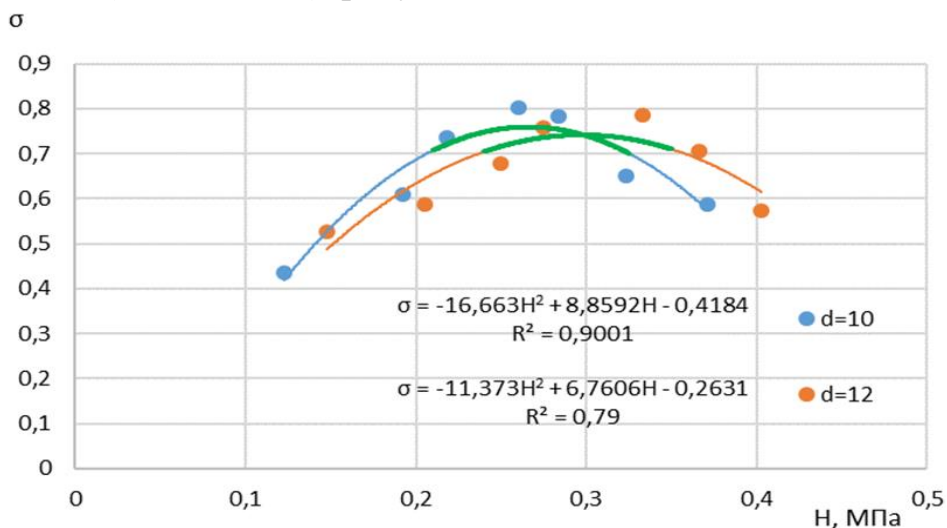


Рисунок 10 – Зависимость коэффициента равномерности полива для дефлекторной насадки с углом конуса дефлектора 120°

Обобщены основные результаты разработки и испытаний. Разработанная дождевальная насадка позволяет снизить поверхностный сток за счёт регулирования интенсивности дождя, улучшить равномерность распределения влаги, адаптировать режим полива к конкретным почвенно-рельефным условиям, а также использовать насадку для внесения жидких удобрений и химикатов.

В шестой главе представлены результаты оценки урожайности суданской травы, её кормовой ценности, а также экономической и энергетической эффективности возделывания при различных режимах орошения на основе экспериментальных данных, полученных в 2020–2022 гг.

Приведены данные по урожайности суданской травы. В среднем за три года урожайность сухого вещества составила: без орошения – 89,87 ц/га; при поддержании нижнего порога влажности 70...80 % НВ – 112,37 ц/га (прибавка 22,5 ц/га или 25,0 %); при пороге 80...90 % НВ – 124,30 ц/га (прибавка 34,44 ц/га или 38,3 %). Орошение также улучшило кормовую ценность: содержание сырого протеина повысилось с 9,8...10,6 % (контроль) до 12,4...14,5 % (80 % НВ).

Выполнена оценка экономической эффективности. При расчёте по цене овса 2-го класса рентабельность составила: без орошения – 13,30...75,96 %; 70...80 % НВ – 43,98...97,91 %; 80...90 % НВ – 71,20...145,66 %. Чистый доход на варианте 80...90 % НВ был в 1,5...3 раза выше, чем на варианте 70...80 % НВ, и в 3...6 раза выше, чем на контроле. Выход кормовых единиц с гектара увеличился с 4,04...4,92 т.к.ед./га (контроль) до 5,50...8,46 т.к.ед./га (орошаемые варианты).

Выполнена оценка энергетической эффективности. Все исследуемые варианты являются энергетически эффективными (агроэнергетический коэффициент $AK > 1$). Сбор обменной энергии (ОЭ) составил: без орошения – 65,60...76,87 ГДж/га; 70...80 % НВ – 84,69...99,65 ГДж/га (прибавка 19,09...22,78 ГДж/га); 80...90 % НВ – 98,66...120,18 ГДж/га (прибавка 33,06...43,31 ГДж/га). Максимальный $AK = 3,05$ достигнут в 2022 г. на варианте 80...90 % НВ. Удельные затраты энергии на 1 ГДж ОЭ снижались с повышением уровня орошения: с 382,07...448,03 МДж/ГДж (контроль) до 328,33...354,97 МДж/ГДж (80 % НВ).

Обоснованы рекомендации по выбору режима орошения. Для условий восточной части Беларуси на дерново-подзолистых почвах при возделывании суданской травы на зелёную массу в годы со средней и повышенной влагообеспеченностью экономически и энергетически целесообразно поддержание порога 70 % НВ (рентабельность 43...97 %, $AK = 2,54...2,75$). В засушливые годы и на приоритетных участках рекомендуется поддержание

порога 80...90 % НВ (рентабельность 71...145 %, АК = 2,82...3,05), что обеспечивает наибольший чистый доход и выход обменной энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе анализа литературных источников установлено, что суданская трава, обладая высокой засухоустойчивостью, является перспективной кормовой культурой для условий восточной части Беларуси. Вместе с тем, для реализации её продуктивного потенциала и нивелирования последствий участвовавших засушливых периодов требуется применение орошения. Наиболее исследованным и рекомендуемым диапазоном регулирования влажности активного слоя почвы (0,4...0,6 м) для культуры является поддержание её на уровне (0,68...0,83) НВ. Выявлено отсутствие зональных параметров водопотребления и биоклиматических коэффициентов для суданской травы в условиях региона, а также необходимость совершенствования технических средств полива для снижения эрозионной опасности дождевания.

2. Впервые для дерново-подзолистых суглинистых почв восточной части Беларуси определено фактическое суммарное водопотребление суданской травы за вегетационные периоды, которое составило: в варианте без орошения – 316,4...359,7 мм; при поддержании влажности не ниже 70...80 % НВ – 394,3...417,6 мм; при поддержании влажности не ниже 80...90 % НВ – 442,6...476,7 мм. Установлены тесные корреляционные связи водопотребления с термическими условиями вегетации, на основе чего разработаны регрессионные модели (3.8...3.10) для прогноза водопотребления, обеспечивающие точность расчёта с отклонением от фактических значений в пределах 4,0...10,6 %.

3. Впервые для исследуемого региона получены и систематизированы зональные биоклиматические коэффициенты суданской травы, значения которых закономерно изменяются по фазам роста и составляют в диапазоне от 0,21 до 0,70 мм/мб.

4. В ходе натурных экспериментов на стоковых площадках выявлены ключевые факторы формирования поверхностного стока при дождевании. Доказано, что увеличение интенсивности дождя с 0,21 до 0,36 мм/мин и уклона участка с 0,003 до 0,006 приводит к кратному росту стока. Впервые для условий региона количественно подтверждена регулирующая роль развитие листовой поверхности суданской травы свыше 100...130 см² на растении способствует снижению стока вплоть до его полного отсутствия. Установлено, что скорость впитывания воды в почву к концу часового дождевания стабилизируется на уровне 0,22...0,25 мм/мин, что является предельно допустимой интенсивностью для данного типа почв.

5. Разработана и запатентована новая конструкция мелкодисперсного дождевального насадка (патент РФ № 2852370). В результате лабораторных и полевых испытаний установлены его основные технические и технологические параметры: средний коэффициент расхода составляет $\mu = 0,842$, что свидетельствует о гидравлической эффективности конструкции; оптимальной признана конструкция с углом конуса дефлектора 120° , обеспечивающая среднюю интенсивность дождя (0,21...0,24 мм/мин), не превышающую скорость впитывания почвы; установлены рабочие диапазоны давлений и соответствующие им радиусы полива (для сопла 10 мм при напоре 0,22...0,33 МПа радиус составляет 11...13 м; для сопла 12 мм при напоре 0,27...0,35 МПа – 12...15 м); формируемый искусственный дождь характеризуется преимущественно мелкодисперсной структурой (средний диаметр капель 0,54...1,86 мм), а максимальная равномерность полива достигается в диапазонах давления 0,24...0,31 МПа (для сопла 10 мм) и 0,25...0,35 МПа (для сопла 12 мм).

6. Экономическая и энергетическая оценка подтвердила высокую эффективность рекомендуемых приёмов. Применение орошения обеспечило стабильную прибавку урожайности сухой массы: в среднем +25,0 % при режиме 70 % НВ и +38,3 % при режиме 80 % НВ. Максимальная урожайность зеленой массы (655,3 ц/га) и сухого вещества (136,5 ц/га) получена в 2022 г. на варианте с поддержанием влажности 80 % НВ. Орошение также улучшает качество корма: содержание сырого протеина возрастает с 9,8...10,6 % до 12,4...14,5 %. Рентабельность производства (в ценах на овёс 2-го класса) на орошаемых вариантах достигала 109,1 % (80 % НВ) против 55,9 % на контроле. Энергетическая эффективность подтверждается ростом агроэнергетического коэффициента с 2,23...2,62 без орошения до 3,05 при орошении (80 % НВ), что свидетельствует о снижении удельных энергозатрат на производство кормовой энергии.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Дубенок, Н.Н. Водопроницаемость почвы и поверхностный сток при дождевании суданской травы в условиях восточной части Беларуси / Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов, И.А. Левшунов // Мелиорация; Минск, 2025. – № 3 – С. 39 – 44.
2. Дубенок, Н.Н. Дефлекторная насадка для повышения качества полива дождеванием / Н.Н. Дубенок, И.А. Левшунов, Ю.А. Мажайский, А.В. Гемонов // Вестник РГАТУ им. П.А. Костычева; Рязань, 2026. – Т.18, №2 – С. 120 – 128.
3. Яланский Д.В. Допустимые технологические параметры искусственного дождя с использованием БШДУ Bauer «Rainstar T-61» при орошении дождеванием многолетних трав / Д.В. Яланский, И.А. Левшунов, Ю.А. Мажайский, М.И. Голубенко // Природообустройство;

Москва, 2026. – Т.19, №4 – С. 23 – 31.

4. Дубенок, Н.Н. Режим орошения суданской травы на зелёный корм в восточной части Беларуси / Н.Н. Дубенок, И.А. Левшунов, А.В. Гемонов // Мелиорация и водное хозяйство; Москва, 2026. – № 4 – С. 14 – 18.

Публикации в рецензируемых научных изданиях:

5. Левшунов И.А. Влияние интенсивности атмосферных осадков, уклона поверхности и сельскохозяйственного использования земель на поверхностный сток / И.А. Левшунов // Мелиорация; Минск, 2016. – № 4 – С. 40 – 43.

6. Левшунов И.А. Формирование поверхностного стока в условиях северо-восточной части Беларуси / И.А. Левшунов, О.Б. Ракицкий // Адаптивно-ландшафтные системы земледелия – Основы эффективного использования мелиорируемых земель: материалы междунар. науч.-прак. конфер. (Тверь, ФГБПУВ – НИИМЗ, 27 сентября 2017). – Тверь: из-во ТвГУ, 2017. Кн.2. – С.80-84.

7. Левшунов И.А. Влияние влажности почвы на величину поверхностного стока / И.А. Левшунов // Эффективное использование мелиорированных земель: проблемы и решения: материалы междунар. науч.-прак. конфер. (Тверь, ФГБПУВ – НИИМЗ, 28 сентября 2018). – Тверь: из-во ТвГУ, 2018 – С.316-319.

8. Лукашевич В.М. Совершенствование технологии дождевания на дерново-подзолистых суглинистых почвах / В. М. Лукашевич, И. А. Левшунов // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий: сб. науч. тр. Вып. 8 / под общ. ред. Ю.А. Мажайского – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2020. – С. 71-74.

9. Левшунов И.А. Водопроницаемость почвы и ливневой сток / И.А. Левшунов // Экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты современных мелиоративных технологий: сб. науч. тр. Вып. 8 / под общ. ред. Ю.А. Мажайского – М.: ООО «Сам Полиграфист», 2020. – С. 242-244.

10. Ivan Levshunov, The feasibility of using soil runoff in calculating the water balance of ameliorated soil // Ivan Levshunov, Yuri Mazhayskiy, Olga Chernikova; E3S Web of Conferences 285, 06003 (2021), ABR 2021, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128506003>

11. Левшунов, И.А., Величина поверхностного стока на землях с различными уклонами и сельскохозяйственным использованием / И.А. Левшунов, Ю.А. Мажайский, О.В. Черникова // Вестник КрасГАУ; Красноярск, 2022. – № 2 – С. 35 – 41.

12. Левшунов, И.А. Возделывание суданской травы в условиях орошения / И. А. Левшунов // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель: материалы междунар. науч.-прак. конфер., посвящённой 105-летию кафедры мелиорации и водного хозяйства / редкол.: В.И. Желязко [и др.] – Горки: БГСХА, 2024. – С. 61-65.

13. Левшунов И.А. Водная эрозия и поверхностный сток в северо-восточной части Беларуси / И.А. Левшунов // Актуальные научно-технические и экологические проблемы мелиорации земель: материалы междунар. науч.-прак. конфер., посвящённой 105-летию кафедры мелиорации и водного хозяйства / редкол.: В.И. Желязко [и др.] – Горки: БГСХА, 2024. – С. 116-121.

14. Левшунов И.А. Водный режим суданской травы в восточной части Беларуси при дождевании / И.А. Левшунов. Н.Н. Дубенок, А.В. Гемонов // Современное состояние, проблемы и перспективы развития аграрной науки: материалы X международной научной конференции, Симферополь, 8-12 сентября 2025 г. [Электронный ресурс] / науч. ред. В.С.

Паштецкий. – Электрон. дан. - Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2025. – 75 с.

15. Дубенок Н.Н. Ресурсосберегающие технологии орошения суданской травы в условиях восточной части Беларуси / Н.Н. Дубенок, Ю.А. Мажайский, А.В. Гемонов, И.А. Левшунов // Комплексный подход к научно-техническому обеспечению сельского хозяйства: материалы междунар. науч.-прак. конф., посвящённой памяти члена-корреспондента РАСХН и НАНКС академик МАЭП и РАВН Бочкарёва Я.В. – Рязань: РГАТУ, 2026. – С. 37-42.

Авторские свидетельства, патенты, лицензии:

16. Пат. 2852370 Российская Федерация В05В 1/18. Мелкодисперсный дождевальная насадка / Н.Н. Дубенок, И.А. Левшунов, М.И. Голубенко, Ю.А. Мажайский; заявитель и патентообладатель общество с ограниченной ответственностью «Мещерский научно-технический центр» – № 2025112550; заявл. 12.05.2025; опубл. 08.12.2025. – Бюл. № 34. – 7 с.