

Научная статья

Original article

УДК 631.34

DOI 10.55186/25880209_2025_9_6_14

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
ШИРОКОЗАХВАТНЫМИ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ:
АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В МОСТОВОМ
ЗЕМЛЕДЕЛИИ**

AUTOMATED CONTROL SYSTEMS FOR WIDE-COVER IRRIGATION
MACHINES: ANALYSIS AND PROSPECTS FOR APPLICATION IN BRIDGE
FARMING



Мищенко Николай Андреевич, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6002-5202>, mishenko.nikolai@bk.ru.

Лебедев Денис Андреевич, младший научный сотрудник, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483 Московская обл., Коломенский район, пос. Радужный, 38), тел. 8(496)6-170-474, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0983-1318>, denislebedev992@gmail.com.

Nikolai Mishenko, candidate of technical sciences, the Leading Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute

«Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6002-5202>, mishenko.nikolai@bk.ru.

Denis Lebedev, Junior Researcher, Federal State Budgetary Scientific Institution «All-Russian Scientific Research Institute «Raduga» (Moscow Region, Kolomna District, settl. Raduzhny), tel. 8(496)6-170-474, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0983-1318>, denislebedev992@gmail.com.

Аннотация. В контексте разработки отечественной технологии мостового земледелия для мелиорируемых земель в статье представлен комплексный анализ современных систем автоматизации широкозахватных дождевальных машин кругового типа. Исследование направлено на формирование технических требований к созданию автоматизированной системы управления многофункциональным электрифицированным мостовым агрегатом. Проведен детальный обзор архитектурных решений и технологических подходов, применяемых ведущими мировыми производителями, такими как Valley (Valmont Irrigation), Lindsay (Zimmatic), T-L Irrigation и Reinke.

В работе последовательно рассмотрены три ключевых уровня автоматизации. Первый уровень — система движения и выравнивания, где проанализированы эволюция датчиков контроля положения (от механических тросов к GPS-модулям), роль программируемых логических контроллеров с продвинутыми алгоритмами (ПИД-регуляторы) и сравнительные характеристики исполнительных механизмов — электромеханических и гидростатических приводов ходовых тележек. Второй уровень — автоматизация управления поливом — включает анализ методов стабилизации давления в трубопроводе, управления нормой вылива и, что наиболее значимо, технологий дифференцированного орошения (VRI), позволяющих адаптивно управлять водоподачей на основе электронных карт-заданий. Третий, высший уровень, составляют системы удаленного мониторинга, управления и анализа данных (FieldNET, Valley 365), которые интегрируют телеметрию машин с данными почвенных датчиков, метеостанций и дистанционного зондирования. Показано, что современная тенденция заключается в переходе от простой автоматизации к

созданию интеллектуальных агротехнических систем, способных к предиктивному управлению на основе моделей водного баланса. Это обеспечивает не только значительную экономию водных и энергетических ресурсов, но и повышение урожайности и экологической безопасности сельскохозяйственного производства на мелиорируемых землях.

Abstract. Within the framework of developing domestic bridge-type farming technology for reclaimed lands, this article provides a comprehensive analysis of modern automation systems for center pivot irrigation machines.

The research aims to establish technical requirements for creating an automated control system for a multifunctional electrified agricultural unit. A detailed review of the architectural solutions and technological approaches employed by leading global manufacturers, such as Valley (Valmont Irrigation), Lindsay (Zimmatic), T-L Irrigation, and Reinke, is presented.

The study systematically examines three key levels of automation. The first level is the motion control and alignment system, which analyzes the evolution of position monitoring sensors (from mechanical cables to GPS modules), the role of programmable logic controllers with advanced algorithms (PID controllers), and the comparative characteristics of actuators—electromechanical and electrohydraulic drive systems for mobile towers. The second level—irrigation management automation—includes an analysis of methods for stabilizing pressure in the pipeline, controlling the application rate, and, most significantly, Variable Rate Irrigation (VRI) technologies that enable adaptive water management based on electronic prescription maps. The third and highest level comprises remote monitoring, control, and data analysis systems (FieldNET, Valley 365), which integrate machine telemetry with data from soil sensors, weather stations, and remote sensing. The study demonstrates that the current trend involves a shift from simple automation to the creation of intelligent agricultural systems capable of predictive management based on water balance models. This ensures not only significant savings in water and energy resources but also increased crop yields and enhanced environmental safety of agricultural production on reclaimed lands.

Ключевые слова: дождевание, управление орошением, система автоматизации, мостовой агрегат, дождевальная машина кругового типа, прецизионное орошение.

Keywords: sprinkler irrigation, irrigation management, irrigation automation system, bridge-type sprinkler system, center pivot irrigation system, precision irrigation.

Введение. На данный момент сотрудниками ФГБНУ ВНИИ «Радуга» в рамках Государственного задания проводится обоснование и разработка технологии мостового земледелия на мелиорируемых землях с применением современных технологий информационного обеспечения и автоматизации процессов сельскохозяйственного производства, целью которой является создание автоматизированной системы управления многофункциональным электрифицированным агрегатом мостового типа для полива, внесения химмелиорантов и средств защиты растений в экологически безопасном режиме на базе узлов дождевальной машины типа «Кубань», обеспечивающую:

- автоматизацию управления движением и режимами работы дождевальной машины;
- точное внесение агрохимикатов (удобрений, пестицидов);
- непрерывный мониторинг агрофизических параметров почвы (влажность, температура) и метеопараметров;
- интеграцию с системами (АСУП хозяйства, геоинформационные системы (ГИС)) [7].

Современные системы автоматизации широкозахватных дождевальных машин кругового действия представляют собой не просто набор устройств, а сложные системы, интегрированные в концепцию «точного земледелия». Анализ решений ведущих производителей позволяет выделить несколько архитектурных уровней автоматизации, каждый из которых вносит свой вклад в общую эффективность.

Материалы и методы. Настоящее исследование выполнено с применением комплекса методов системного анализа и сравнительного обзора. В качестве основного материала исследования выступили архитектурные принципы, технические характеристики и функциональные возможности систем

автоматизации широкозахватных дождевальных машин кругового типа, используемых ведущими мировыми производителями, такими как Valley (Valmont Irrigation), Lindsay (Zimmatic), T-L Irrigation и Reinke. Методология анализа предусматривала детализацию общей системы на три структурно-функциональных уровня: система движения и выравнивания, система управления поливом и системы удаленного мониторинга и анализа данных. Для каждого уровня проводилось детальное изучение эволюции компонентной базы, принципов работы и алгоритмического обеспечения. Особое внимание уделялось анализу интеграционных возможностей различных систем и их соответствуию принципам точного земледелия.

Результаты. Система автоматизации движения и выравнивания является краеугольным камнем в функционировании любой широкозахватной дождевальной машины кругового действия [8]. Ее основная и первостепенная задача – преобразовать протяженную, гибкую и многозвенную конструкцию, насчитывающую десятки ходовых тележек, в жестко управляемый и геометрически стабильный механизм, способный двигаться по заданной круговой траектории без риска перекоса или «складывания».

Принцип работы всех современных систем выравнивания базируется на постоянном контроле положения крайней (концевой) башни машины относительно ее центральной опоры. Для измерения этого расстояния используются высокоточные датчики. Исторически первым массовым решением был механический трос, натянутый между центральной опорой и концевой башней, длина которого измерялась потенциометром. Однако его недостатками являлись подверженность обрывам, провисанию и влиянию рельефа. На смену ему пришли бесконтактные технологии. Радарные дальномеры, излучающие радиоволны в направлении центра и анализирующие отраженный сигнал, получили широкое распространение благодаря своей всепогодности и надежности, не зависящей от запыленности, тумана или осадков. Лазерные дальномеры предлагают повышенную точность, но могут быть чувствительны к загрязнению оптики и сильным атмосферным помехам. Наиболее перспективной технологией является использование GPS-модулей, устанавливаемых

непосредственно на концевую башню. Данный метод позволяет определять не относительное расстояние до центра, а абсолютные координаты башни в геодезической системе, что является фундаментом для точного позиционирования машины на поле.

Полученные с датчика данные поступают в программируемый логический контроллер (ПЛК), установленный в центральной башне. Этот контроллер является вычислительным центром системы. Его алгоритм непрерывно сравнивает фактическое расстояние до концевой башни с эталонным (расчетным) значением, которое определяется исходя из количества активных секций и их проектной длины.

Исполнительным звеном данной системы являются приводы ходовых тележек. В промышленности сформировались два основных типа. Электромеханический привод подразумевает установку на каждой тележке индивидуального электродвигателя, получающего команды от центрального контроллера по проложенному вдоль крыла кабелю или по беспроводному радиоканалу. Его преимуществами являются относительная простота и независимость от гидравлической системы [1].

Производители, ориентированные на электромеханический привод, такие как Lindsay Corporation с брендом Zimmatic, Valmont Industries с брендом Valley и Reinke Manufacturing Company делают акцент на энергоэффективности и эксплуатационной простоте. В их системах индивидуальные электродвигатели, установленные на каждой ходовой тележке, получают управляющие сигналы непосредственно от центрального контроллера. Ключевыми преимуществами данной архитектуры являются высокий коэффициент полезного действия, обусловленный прямым преобразованием электрической энергии в механическое движение без промежуточных гидравлических потерь. Современным развитием данного направления является интеграция частотно-регулируемых преобразователей, обеспечивающих плавное управление скоростью двигателей и дополнительную оптимизацию энергопотребления (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Электромеханический привод ходовой тележки X-Tec, используемый на широкозахватных дождевальных машинах Valley (Valmont Irrigation)

В противоположность этому, производители, применяющие гидростатический привод, в числе которых T-L Irrigation, обосновывают свой выбор требованиями к высокой мощности и надежности в экстремальных условиях. Их системы используют центральную гидростанцию и соленоидные клапаны, управляемые гидромоторами на тележках. Критическим преимуществом данного привода является способность гидромоторов развивать значительный крутящий момент при низких скоростях вращения, что обеспечивает преодоление сложного рельефа, тяжелых почвенных условий и гарантирует стабильную работу протяженных и нагруженных машин. Данный подход предполагает более высокую устойчивость к пиковым нагрузкам и перегрузкам, что рассматривается как ключевой фактор надежности в определенных агроклиматических зонах (Рисунок 2).

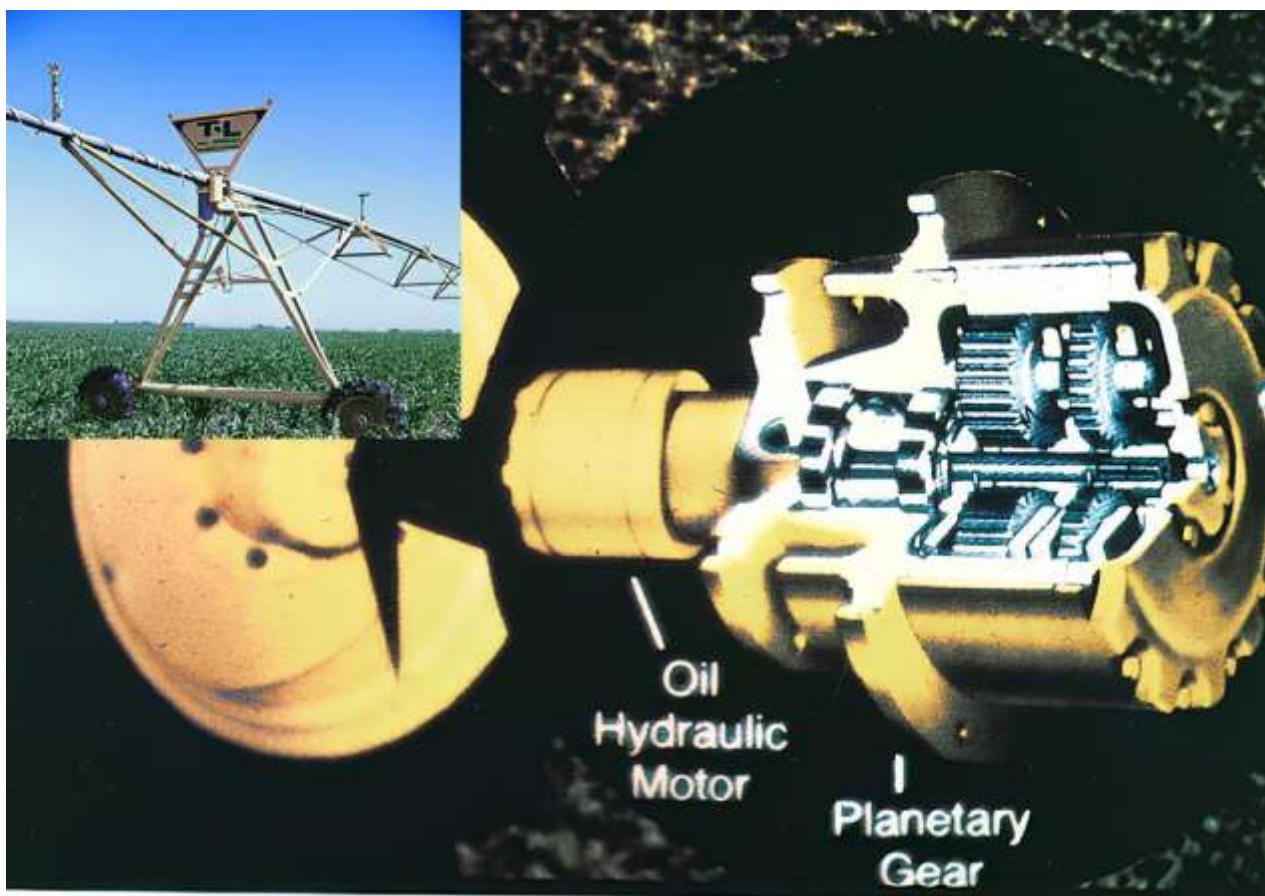


Рисунок 2 – Гидростатический привод ходовой тележки, используемый на широкозахватных дождевальных машинах T-L Irrigation

Важно отметить, что данное разделение не является абсолютным. В стремлении к оптимизации некоторые производители могут предлагать гибридные решения или варианты в зависимости от модели и потребностей заказчика.

Современные системы также включают в себя подсистему управления скоростью движения. За эту функцию отвечают частотные преобразователи, которые регулируют скорость вращения электродвигателей тележек (в электромеханическом приводе) или производительность центрального гидравлического насоса (в гидравлическом приводе). Это позволяет точно задавать и плавно изменять скорость движения машины, что напрямую определяет норму полива.

Система автоматизации управления поливом надстраивается над базовой системой движения и выравнивания. Ее архитектура и функциональные возможности напрямую определяют такие ключевые агротехнические показатели, как равномерность распределения осадков, коэффициент полезного

использования водных ресурсов и, в конечном итоге, продуктивность возделываемой культуры [5].

Фундаментальной задачей данной системы является поддержание номинального давления в трубопроводе машины на всем его протяжении. Перепады высот, гидравлическое сопротивление и изменение расхода через дождевальные аппараты приводят к тому, что давление у центральной опоры и на концевой башне может значительно различаться, что вызывает неравномерность полива. Для решения этой проблемы применяются автоматические регуляторы давления. Эти устройства, устанавливаемые на каждой секции машины, представляют собой механические или электронно-управляемые клапаны, работающие по принципу отрицательной обратной связи. Внутри регулятора находится чувствительный элемент – мембрана или поршень, на который с одной стороны воздействует давление воды в трубопроводе, а с другой – усилие предварительно настроенной пружины. При увеличении давления выше заданного порога мембрана смещается, приводя в движение клапан, который уменьшает проходное сечение, тем самым повышая локальное гидравлическое сопротивление и снижая давление на выходе из секции. При падении давления процесс происходит в обратном порядке. Таким образом, регулятор динамически «дросселирует» поток, обеспечивая стабилизацию давления в узком рабочем диапазоне независимо от колебаний на входе, что гарантирует идентичный радиус полива и размер капель у всех дождевальных аппаратов.

Следующей критически важной подсистемой является управление нормой вылива. Норма вылива является производной от трех параметров: расхода воды через машину, ширины захвата и скорости движения. Поскольку расход и ширина захвата являются относительно постоянными величинами для конкретной конфигурации, основным управляющим воздействием становится именно скорость перемещения машины по полю. Современные контроллеры позволяют оператору задавать норму вылива непосредственно в миллиметрах, после чего встроенное программное обеспечение автоматически вычисляет требуемую линейную скорость [4].

Наиболее совершенным уровнем развития системы управления поливом является технология дифференцированного орошения, известная как Variable Rate Irrigation. Ее работа базируется на использовании электронных карт-заданий, которые загружаются в бортовой контроллер или передаются ему дистанционно через облачную платформу. Эти карты отражают неоднородность поля по таким параметрам, как гранулометрический состав почвы, влагоемкость, содержание органического вещества, рельеф или состояние посевов, определяемое по вегетационным индексам. Это позволяет создавать сложные геометрические зоны полива, вплоть до орошения отдельных участков внутри поля сложной формы, эффективно исключая перерасход воды на несельскохозяйственных землях, дорогах или участках с высоким уровнем грунтовых вод.

Таким образом, система автоматизации управления поливом эволюционировала от простой стабилизации физических параметров до интеллектуальной системы, способной адаптивно управлять водоподачей. Ее интеграция с системами мониторинга влажности почвы и данными дистанционного зондирования позволяет перейти к предиктивному управлению, когда полив назначается не по факту возникновения водного дефицита, а на основе прогнозных моделей, что обеспечивает максимальную эффективность использования водных и энергетических ресурсов в современном сельскохозяйственном производстве [9].

Системы удаленного мониторинга, управления и анализа данных представляют собой высший уровень автоматизации широкозахватной дождевальной техники, трансформируя физические машины в элементы комплексной цифровой экосистемы управления агрономией. Платформы, такие как FieldNET (Lindsay), Valley 365 (Valmont Industries) или Pro-Center (Reinke), не являются простыми средствами дистанционного контроля; они функционируют как центральные нервные узлы, аккумулирующие данные, анализирующие их и предоставляющие инструменты для предиктивного управления.

Архитектура таких систем строится по распределенному принципу. На каждой дождевальной машине устанавливается специализированный бортовой

компьютер, оснащенный модулем сотовой или спутниковой связи. Этот шлюз выполняет роль посредника между локальной сетью датчиков и контроллеров машины и облачным сервером платформы. Он непрерывно собирает телеметрическую информацию: координаты и скорость движения, давление в трубопроводе, расход воды, напряжение бортовой сети, статус всех исполнительных механизмов и коды ошибок. Эти данные в сжатом и защищенном виде передаются на облачный сервер с заданной периодичностью или по событию.

Пользовательский интерфейс реализован через веб-портал или мобильное приложение, что предоставляет агроному или механизатору возможность удаленного управления всеми процессами. Функционал управления является исчерпывающим: дистанционный запуск и остановка полива, изменение скорости движения и, следовательно, нормы вылива, перенастройка давления изменения направления движения.

Однако ключевая ценность современных платформ заключается не столько в удаленном управлении, сколько в их аналитических возможностях, основанных на агрегации больших данных. Эти системы способны интегрировать информацию из множества внешних источников, таких как почвенные датчики, данные метеостанций, спутниковые снимки и данные с БПЛА. На основе этой информации платформы реализуют свои функции и принимают решения. Алгоритмы платформы, используя модели водного баланса, могут автоматически рассчитывать дефицит влаги в корнеобитаемом слое и формировать рекомендации по дате и норме следующего полива.

Обсуждение. Анализ полученных результатов позволяет констатировать, что современные системы автоматизации представляют собой не набор разрозненных устройств, а сложные интегрированные комплексы, функционирующие на трех взаимосвязанных уровнях. Наблюдаемая тенденция заключается в переходе от простой автоматизации выполнения отдельных операций к созданию интеллектуальных агротехнических систем, способных к предиктивному адаптивному управлению на основе интеграции данных и моделей водного баланса. Проанализированные технологические решения

демонстрируют, что такой подход обеспечивает не только значительную экономию водных и энергетических ресурсов через оптимизацию режимов орошения и минимизацию непродуктивных потерь, но и способствует повышению урожайности сельскохозяйственных культур за счет поддержания оптимального водного режима [6]. Проведенный анализ и выявленные технологические тренды формируют комплекс обоснованных технических требований к разработке отечественной автоматизированной системы управления для многофункционального электрифицированного агрегата мостового типа [2,3].

Выводы. Проведенный анализ современных систем автоматизации широкозахватных дождевальных машин кругового типа позволяет сформулировать комплекс выводов для разработки отечественной технологии мостового земледелия. Установлено, что современные системы представляют собой не набор разрозненных устройств, а сложные интегрированные комплексы, функционирующие на трех взаимосвязанных уровнях. Такой многоуровневый архитектурный подход обеспечивает геометрическую стабильность многозвездной конструкции, точность выполнения технологических операций и интеграцию в общую цифровую экосистему хозяйства. Выявлены ключевые технологические тенденции, заключающиеся в переходе от простых механических решений к использованию высокоточных GPS-модулей для позиционирования, от реактивного управления к предиктивному на основе моделей водного баланса, а также от равномерного орошения к дифференцированному с использованием электронных карт-заданий. Таким образом, эволюция систем автоматизации движется в сторону создания интеллектуальных агротехнических комплексов, что задает стратегическое направление для разработки российского многофункционального агрегата мостового типа, направленного на повышение эффективности и экологической безопасности мелиорируемого земледелия.

Список источников

1. Есин, А. И. Ресурсосберегающие технологии и дождевальные машины кругового действия / А. И. Есин, Л. А. Журавлева, В. А. Соловьев. –

Саратов: Общество с ограниченной ответственностью Издательство «КУБиК», 2019. – 214 с. – ISBN 978-5-91818-614-5. – EDN NKFGPB.

2. Мищенко, Н. А. Влияние параметров мостового агрегата на повышение экологичности полива и снижения деградационного воздействия на почву / Н. А. Мищенко // Экология и строительство. – 2024. – № 2. – С. 29-34. – DOI 10.35688/2413-8452-2024-02-005. – EDN ZAPLFG.

3. Мищенко, Н. А. Перспективы развития многоцелевого использования многоопорных дождевальных машин / Н. А. Мищенко // Вестник мелиоративной науки. – 2024. – № 3. – С. 176-181. – EDN KEPRZH.

4. Ольгаренко Г.В. Ресурсосберегающие эффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения. Справочник / Г.В. Ольгаренко, В.И. Городничев, А.А. Алдошкин -М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. -264 с. EDN: YSVGXC.

5. Ресурсосбережение - как основа совершенствования многоопорных дождевальных машин / Н. Ф. Рыжко, С. Н. Рыжко, Е. С. Смирнов, С. А. Хорин // Природообустройство. – 2022. – № 1. – С. 12-19. – DOI 10.26897/1997-6011-2022-1-12-19. – EDN JBGGHC.

6. Снипич, Ю. Ф. Интенсификация технологий и совершенствование технических средств орошения дождеванием: специальность 06.01.02 "Мелиорация, рекультивация и охрана земель": диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Снипич Юрий Фёдорович. – Новочеркасск, 2011. – 340 с. – EDN SUNZCV.

7. Турапин С.С., Мищенко Н.А., Брыль С.В., Рязанцев А.И. и др. Обосновать и разработать технологию мостового земледелия на мелиорируемых землях с применением современных технологий информационного обеспечения и автоматизации процессов сельскохозяйственного производства, ФГБНУ ВНИИ «Радуга», отчет о НИР, 2023, EDN: UDBZXG.

8. Турапин С.С., Рязанцев А.И. и др. Проведение исследований и разработка энергосберегающих ходовых систем многоопорных широкозахватных дождевальных машин, снижающих удельное давление и

деградацию почвы орошаемых участков", ФГБНУ ВНИИ "Радуга", отчет НИР, 2019. EDN: NUBEZOZ.

9. Эколого-энергетическое совершенствование многоопорных дождевальных машин / С. С. Турапин, Г. В. Ольгаренко, А. И. Рязанцев, А. О. Антипов // Мелиорация и водное хозяйство. – 2021. – № 3. – С. 30-36. – DOI 10.32962/0235-2524-2021-1-30-36. – EDN NLQPHR.

References

1. Yesin, A. I., Zhuravleva, L. A., & Solovyov, V. A. (2019). Resource-saving technologies and center pivot irrigation machines. Saratov: KUBiK Publishing House. 214 p. ISBN 978-5-91818-614-5.
2. Mishchenko, N. A. (2024). Influence of bridge unit parameters on improving the environmental friendliness of irrigation and reducing degradation impact on soil. Ecology and Construction, (2), 29-34. DOI: 10.35688/2413-8452-2024-02-005.
3. Mishchenko, N. A. (2024). Prospects for the development of multipurpose use of multi-span sprinkler machines. Bulletin of Land Reclamation Science, (3), 176-181.
4. Olgarenko, G.V., Gorodnichev, V.I., & Aldoshkin, A.A. (2015). Resource-saving efficient environmentally friendly irrigation technologies and technical means: A Handbook. Moscow: Russian Scientific Research Institute of Information and Technical and Economic Studies for Engineering and Technical Support of Agro-Industrial Complex (Rosinformagrotekh). 264 p.
5. Ryzhko, N. F., Ryzhko, S. N., Smirnov, E. S., & Khorin, S. A. (2022). Resource saving as a basis for improving multi-span sprinkler machines. Prirodobustroistvo, (1), 12-19. DOI: 10.26897/1997-6011-2022-1-12-19.
6. Snipich, Yu. F. (2011). Intensification of technologies and improvement of technical means for sprinkler irrigation: specialty 06.01.02 "Land reclamation, recultivation and protection": dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences. Novocherkassk. 340 p.
7. Turapin, S.S., Mishchenko, N.A., Bryl, S.V., Ryazantsev, A.I., et al. (2023). Substantiate and develop a technology of bridge farming on reclaimed lands

using modern information support technologies and automation of agricultural production processes. FGBNU VNII "Raduga", Research Report.

8. Turapin, S.S., Ryazantsev, A.I., et al. (2019). Conducting research and development of energy-saving undercarriage systems for multi-span wide-span sprinkler machines that reduce specific pressure and degradation of soil in irrigated areas. FGBNU VNII "Raduga", Research Report.

9. Turapin, S. S., Olgarenko, G. V., Ryazantsev, A. I., & Antipov, A. O. (2021). Ecological and energy improvement of multi-span sprinkler machines. Land Reclamation and Water Management, (3), 30-36. DOI: 10.32962/0235-2524-2021-1-30-36.

© Мищенко Н.А., Лебедев Д.А., 2025. International agricultural journal, 2025, № 6, 207-221

Для цитирования: Мищенко Н.А., Лебедев Д.А. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ШИРОКОЗАХВАТНЫМИ ДОЖДЕВАЛЬНЫМИ МАШИНАМИ: АНАЛИЗ И ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ В МОСТОВОМ ЗЕМЛЕДЕЛИИ // International agricultural journal. 2025. № 6, 207-221