

Научная статья

Original article

УДК 631.347.3.012.3.001.2

doi: https://doi.org/10.55186/25880209_2026_10_3_23

edn: AAZDUP

**РАЗРАБОТКА МЕЖСЕЗОННЫХ АГРОТЕХНОЛОГИЙ
ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ МНОГООПОРНОЙ
ШИРОКОЗАХВАТНОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ ТЕХНИКИ
DEVELOPMENT OF OFF-SEASON AGRICULTURAL TECHNOLOGIES
FOR ENERGY SAVING IN THE OPERATION OF MULTI-SUPPORT
WIDE-AREA SPRINKLER EQUIPMENT**



Рязанцев Анатолий Иванович, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, главный научный сотрудник отдела систем орошения дождеванием, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок Радужный, 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9829-8196>, ryazantsev.41@mail.ru

Смирнов Алексей Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры технических систем, теории и методики образовательных процессов ГОУ ВО МО «Государственный социально-гуманитарный университет» (140411, Россия, г. Коломна, ул. Зеленая, д. 30) ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6880-2147>, aigsm@mail.ru

Евсеев Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, научный сотрудник отдела систем орошения дождеванием, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок

Радужный, 38) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6133-2661>,
evseev.evgeniy.1995@mail.ru

Малько Игорь Валерьевич, кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник отдела техники и технологий микроорошения, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок Радужный, 38), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9128-6975>, centorion@yandex.ru

Зубков Федор Васильевич, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры технических систем, теории и методики образовательных процессов, ГОУ ВО МО «Государственный социально-гуманитарный университет» (140411, Россия, г. Коломна, ул. Зеленая, д. 30) ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2697-8035>, fvz7777@yandex.ru

Артюшин Сергей Алексеевич, заведующий учебными мастерскими технологического факультета, ГОУ ВО МО «Государственный социально-гуманитарный университет» (140411, Россия, г. Коломна, ул. Зеленая, д. 30) ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1375-4389>, sergej.artyuшин@gmail.com

Anatoly I. Ryazantsev, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Chief Researcher of the Department of Irrigation Systems by Sprinkling, Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply "Raduga" (140483, Russia, Kolomna, Kolomna city district, Raduzhny settlement, 38), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9829-8196>, ryazantsev.41@mail.ru

Alexey I. Smirnov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Systems, Theory and Methodology of Educational Processes, State University of Higher Education, State University of Social Sciences and Humanities (30 Zelenaya str., Kolomna, 140411, Russia) ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-6880-2147>, aigsm@mail.ru

Evgeny Y. Yevseyev, Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Department of Irrigation Systems by Sprinkling, Federal State Budgetary Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply "Raduga" (140483, Russia, Kolomna, Kolomna city district, Raduzhny settlement, 38) ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6133-2661>, evseev.evgeniy.1995@mail.ru

Igor V. Malko, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Department of Micro-Irrigation Engineering and Technology, Raduga All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply (38 Raduzhny Settlement, Kolomna, 140483, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-9128-6975>, centorion@yandex.ru

Fedor V. Zubkov, Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Technical Systems, Theory and Methodology of Educational Processes, State University of Higher Education, State University of Social Sciences and Humanities (30 Zelenaya str., Kolomna, 140411, Russia) ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2697-8035>, fvz7777@yandex.ru

Sergey A. Artyushin, Head of the Educational workshops of the Faculty of Technology of the State University of Higher Education, State University of Social Sciences and Humanities (30 Zelenaya str., Kolomna, 140411, Russia) ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1375-4389>, sergej.artyushin@gmail.com

Аннотация. В статье рассмотрена актуальная проблема снижения почвенной деформации при эксплуатации широкозахватных дождевальных машин кругового действия, являющихся основным техническим средством орошения в Российской Федерации. На примере машин типа «Фрегат» и «Кубань-ЛК1» показано, что многократное прохождение колёсных опор по одному следу в течение поливного сезона приводит к образованию глубокой колеи (до 300...350 мм), снижению фильтрационных свойств почвы и деградации её структуры. Традиционные подходы, основанные на увеличении площади пятна контакта движителей, не обеспечивают

требуемого эффекта, а перепаживание участков по окончании сезона не устраняет последствий деформации.

В качестве перспективного решения предложена технология, сочетающая использование дискового выравнивающего устройства для заполнения технологической колеи почвой и межсезонную (предзимнюю) подготовку поверхности передвижения с применением многократных циклов замораживания-оттаивания в условиях переувлажнения. Экспериментальные исследования выполнены на среднесуглинистых почвах АО «Озёры» Московской области с применением лабораторной установки, включающей измерительный конус с диаметром основания 15 мм и углом при вершине 30°. Критерием несущей способности почвы служило удельное давление, соответствующее полному погружению конуса.

Установлено, что пять циклов замораживания-оттаивания обеспечивают увеличение плотности почвы приблизительно на 20% и повышение несущей способности при высушивании до влажности 10% на 25% по сравнению с летним вариантом (без замораживания). При моделировании полива нормой 500 м³/га (50 мм) путём послойного добавления воды установлено снижение несущей способности для летнего образца с 1010...1020 кПа до 330...340 кПа, тогда как для образца, подвергнутого пяти циклам замораживания-оттаивания, этот показатель уменьшается с 1250 кПа до 530...540 кПа. Таким образом, предлагаемая технология позволяет повысить допустимое удельное давление на почву при поливе в 1,59...1,61 раза относительно базового варианта и в 6,62...6,75 раза относительно серийного норматива 80 кПа.

Практическая значимость: повышение допускаемого удельного давления до 530...540 кПа даёт возможность уменьшить ширину профиля колёсных движителей на 20...25%, снизить металлоёмкость ходовой части и сократить энергозатраты на передвижение на 8...12% за сезон. Технология не требует капитальной модернизации машин – изменяется лишь регламент эксплуатации и межсезонного обслуживания. Рекомендуемый способ может применяться при орошении площадей, занятых многолетними травами, а

также для межсезонной подготовки поверхности передвижения широкозахватной многоопорной дождевальнoй техники. Внедрение предложенной технологии способствует сохранению плодородия почв, снижению глубины остаточной деформации и уменьшению экологических последствий при эксплуатации дождевальных машин.

Abstract. The article considers the urgent problem of reducing soil deformation during the operation of wide-range circular sprinkler machines, which are the main technical means of irrigation in the Russian Federation. Using the example of machines of the type "Frigate" and "Kuban-LK1", it is shown that repeated passage of wheel bearings along one track during the irrigation season leads to the formation of a deep track (up to 300...350 mm), a decrease in the filtration properties of the soil and degradation of its structure. Traditional approaches based on increasing the area of the contact spot of the propellers do not provide the required effect, and plowing areas at the end of the season does not eliminate the effects of deformation.

As a promising solution, a technology has been proposed that combines the use of a disk leveling device to fill a technological track with soil and off-season (pre-winter) preparation of the movement surface using multiple freeze-thaw cycles in waterlogged conditions. Experimental studies were performed on medium-loamy soils of JSC Ozery in the Moscow region using a laboratory installation including a measuring cone with a base diameter of 15 mm and an angle at the apex of 30 °. The criterion for the bearing capacity of the soil was the specific pressure corresponding to the complete immersion of the cone.

It was found that five freeze-thaw cycles provide an increase in soil density by approximately 20% and an increase in bearing capacity when dried to a humidity of 10% by 25% compared to the summer version (without freezing). When modeling irrigation with a rate of 500 m³/ha (50 mm) by layer-by-layer addition of water, a decrease in the bearing capacity was found for a summer sample from 1010...1020 kPa to 330...340 kPa, whereas for a sample subjected to five freeze-thaw cycles, this indicator decreases from 1250 kPa to 530...540 kPa. Thus, the

proposed technology makes it possible to increase the permissible specific pressure on the soil during irrigation by 1.59...1.61 times relative to the basic version and by 6.62...6.75 times relative to the serial standard of 80 kPa.

Practical significance: increasing the permissible specific pressure to 530...540 kPa makes it possible to reduce the profile width of the wheel thrusters by 20...25%, reduce the metal consumption of the chassis and reduce energy consumption for movement by 8... 12% per season. The technology does not require major modernization of the machines – only the rules of operation and off-season maintenance are being changed. The recommended method can be used for irrigation of areas occupied by perennial grasses, as well as for off-season surface preparation for the movement of wide-range multi-support sprinkler equipment. The implementation of the proposed technology helps to preserve soil fertility, reduce the depth of residual deformation and reduce the environmental consequences during the operation of sprinklers.

Ключевые слова: мелиорация, дождевальные машины кругового действия, «Фрегат», «Кубань-ЛК1», почвенная деформация, несущая способность почвы, удельное давление, циклы замораживания-оттаивания, межсезонная подготовка, выравнивающее устройство, упрочнение поверхности передвижения

Keywords: melioration, circular sprinklers, "Frigate", "Kuban-LK1", soil deformation, bearing capacity of the soil, specific pressure, freeze-thaw cycles, off-season preparation, leveling device, hardening of the surface of movement

Введение. Мелиорация земель является одним из ключевых факторов обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого развития агропромышленного комплекса Российской Федерации. В условиях зон рискованного земледелия, а также в регионах с недостаточным или неравномерным естественным увлажнением, орошаемое земледелие позволяет гарантированно получать высокие и стабильные урожаи сельскохозяйственных культур. Приоритетное значение в системе

мелиоративных мероприятий отводится техническому перевооружению и повышению эффективности эксплуатации оросительных систем, что особенно актуально в свете государственных программ по вовлечению в оборот неиспользуемых сельхозземель и увеличению продуктивности мелиорируемых угодий.

Среди технических средств орошения наиболее широкое распространение получили широкозахватные дождевальные машины кругового действия, в частности такие как «Фрегат» (рисунок 1, а) и «Кубань-ЛК1» (рисунок 1, б). Их применение обеспечивает высокую равномерность распределения дождя, значительную производительность и возможность автоматизации полива на больших площадях. Однако интенсивная эксплуатация данной техники, особенно на тяжелых по гранулометрическому составу почвах, сопровождается негативным воздействием ходовых систем на почвенный покров. Многократное прохождение колёсных опор по одному и тому же следу в течение поливного сезона приводит к образованию глубокой колеи, снижению фильтрационных свойств почвы и ухудшению агрофизических показателей пахотного слоя почвы.



а

б

а – ДМ «Фрегат»; б – ДМ «Кубань-ЛК1»

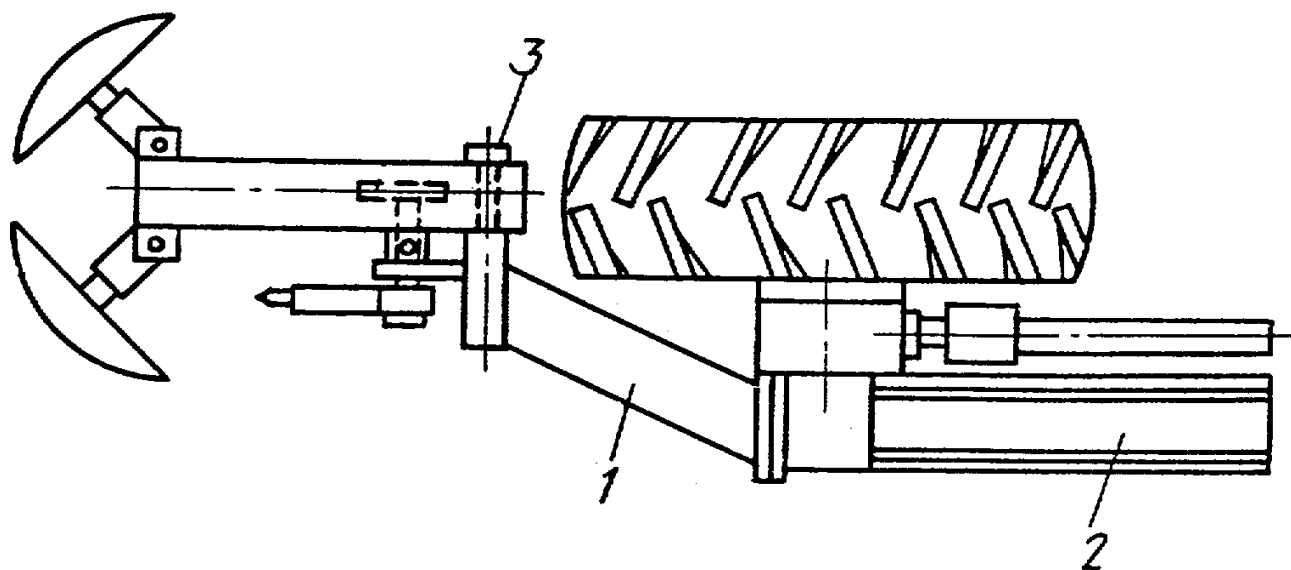
Рисунок 1 – Общий вид широкозахватных дождевальных машин

Основным направлением исследования является снижение значения глубины почвенной деформации, возникающей в конце поливного сезона и достигающей в некоторых случаях значений от 300 до 350 мм. Подходы, связанные со снижением удельного давления на почву за счёт увеличения площади пятна контакта колёсного движителя, исчерпали ресурсные возможности и показали низкую энергетическую и практическую эффективность применения, так как сохраняется возможность появления почвенной деформации с увеличенной глубиной до 500 мм и более. Перепахивание участка по окончании поливного сезона не устраняет последствия деформации с образованием понижений, в которых при поливе возникает переувлажнение, отрицательно влияющее на плодородие возделываемых земель и приводящее к деградации почвенной структуры.

Особенно остро указанная проблема проявляется при эксплуатации широкозахватных дождевальных машин кругового действия типа «Фрегат» и «Кубань-ЛК1». Данные машины, обладая высокой производительностью и значительной длиной консольной части, предъявляют повышенные требования к несущей способности почвы в зоне прохода колёсных опор. Применяемая на них технология движения по кругу приводит к многократному нагружению одного и того же следа, что в условиях серийного подхода усугубляет глубину деформации и снижает межсезонное восстановление плодородия. Именно для этих и подобного типов машин разработка новых методов подготовки поверхности передвижения является наиболее востребованной, так как позволяет без капитальной модернизации ходовой системы существенно повысить эффективность орошения.

Материалы и методы. В качестве теоретической основы для разработки принята технология, обеспечивающая соблюдение экологических требований, сохранение почвенного плодородия и повышение эффективности эксплуатации многоопорной дождевальной техники. Данная технология предполагает использование дискового заравнивающего устройства (рисунок 2), которое способствует упрочнению поверхности

передвижения дождевальной машины (ДМ) за счёт высыхания почвы в межполивной период. В рамках реализации указанной технологии проведены экспериментальные исследования, целью которых являлось определение максимально допустимого удельного давления на почву со стороны колёсных движителей дождевальных машин, обеспечивающего снижение материалоемкости конструкции, энергетических затрат на передвижение и негативного экологического воздействия на орошаемый участок.



а – схема заравнивателя колес;



б – заравнитель на тележке дождевальной машины

1 – кронштейн; 2 – опора; 3 – горизонтальный шарнир

Рисунок 2 – Общий вид устройства для заравнивания колес широкозахватных дождевальных машин

В базовом варианте технологии за период между двумя смежными поливами нормой $m_m = 500$ м³/га (что соответствует интервалу около 7 суток) несущая способность почвы P_0 (допустимое удельное давление ходовой системы на почву) в колее, заполненной посредством дискового заравнивающего устройства, возрастает до 950...1000 кПа. При проведении дождевания данный показатель снижается до 320...340 кПа. Таким образом, относительно требований ГОСТ, устанавливающих величину допустимого удельного давления на почву на уровне 80 кПа, наблюдается более чем четырёхкратное превышение, что позволяет применять колёсные движители с уменьшенной (по сравнению с серийными образцами) шириной профиля.

Дальнейшие исследования были направлены на поиск способов дополнительного повышения несущей способности P_0 , обеспечивающего дальнейшее уменьшение ширины профиля колёсных движителей, снижение материалоемкости и энергетических затрат на передвижение, а также сокращение экологического ущерба для возделываемого участка.

Предлагаемая технология базируется на следующем положении. По окончании поливного сезона ходовыми системами дождевальной машины в серийном исполнении формируется уплотнённый почвенный жёлоб со средней глубиной колеи 100...150 мм. Заполнение данного жёлоба почвой, посредством заравнивающего устройства, в предзимний период в сочетании с круговым поливом нормой $m_m = 500$ м³/га в зимне-весенний период создаёт условия для прохождения многократных циклов замораживания и оттаивания грунта при его переувлажнении. По сравнению с летним циклом «переувлажнение – высыхание», грунт внутри жёлоба в процессе замораживания и оттаивания подвергается более интенсивной структурной перестройке, сопровождающейся дополнительным снижением пористости (рисунок 3, 4).



Рисунок 3 – Структура переувлажнённой и высушенной среднесуглинистой почвы (в условиях АО «Озёры» Московской области)

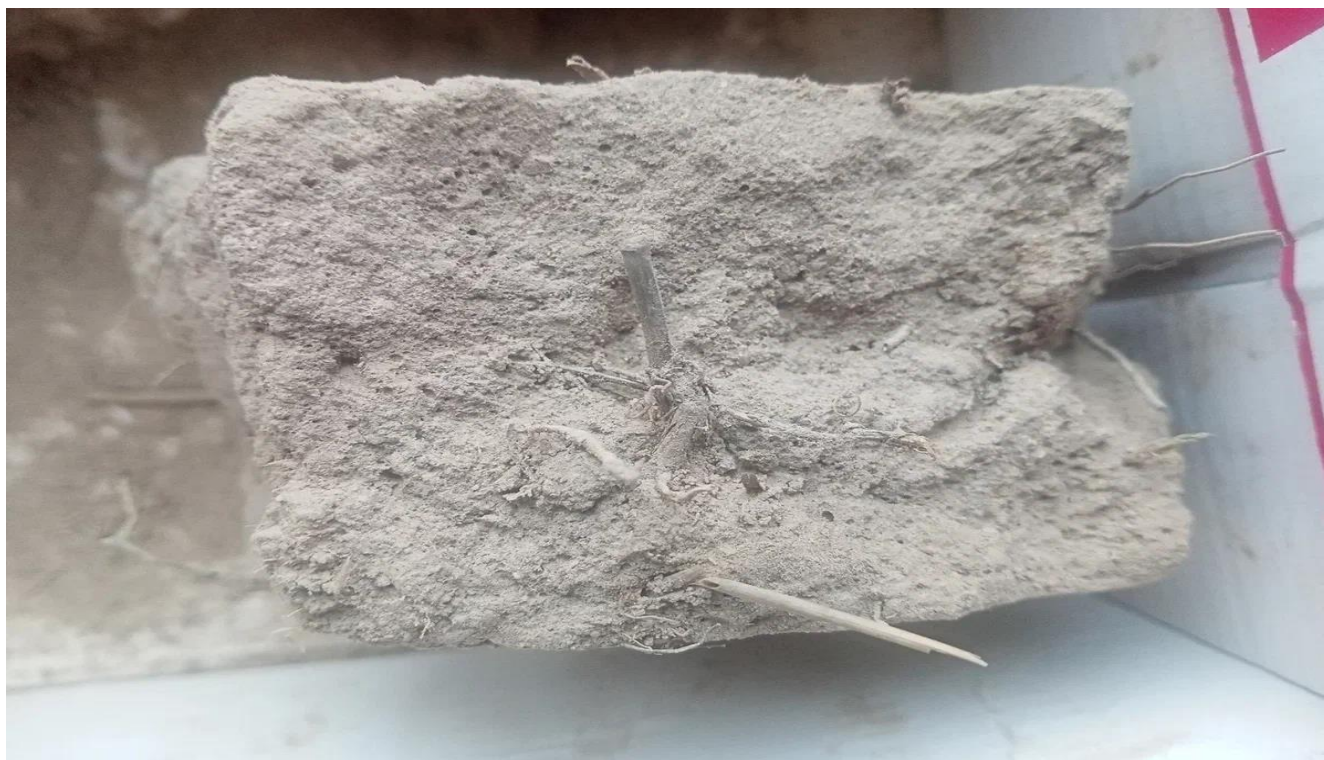


Рисунок 4 – Структура переувлажнённой, однократно замороженной, размороженной и высушенной среднесуглинистой почвы (в условиях АО «Озёры» Московской области)

Проведённые исследования были посвящены определению количественных показателей повышения несущей способности P_0 среднесуглинистой почвы за счёт увеличения плотности (уменьшения пористости) при многократных циклах замораживания-оттаивания в условиях переувлажнения колеи. Исследования выполнялись для почвенных условий АО «Озёры» Московской области.

На рисунке 5 представлены образцы среднесуглинистой почвы, имеющие одинаковую массу до переувлажнения, но различающиеся по высоте слоя после высушивания до влажности $W_0 = 0,10$.



а – образец №2; б – образец №3

Рисунок 5 – Общий вид емкостей с исследуемыми образцами почвы, высушенных до значений влажности $W_0 = 0,10$

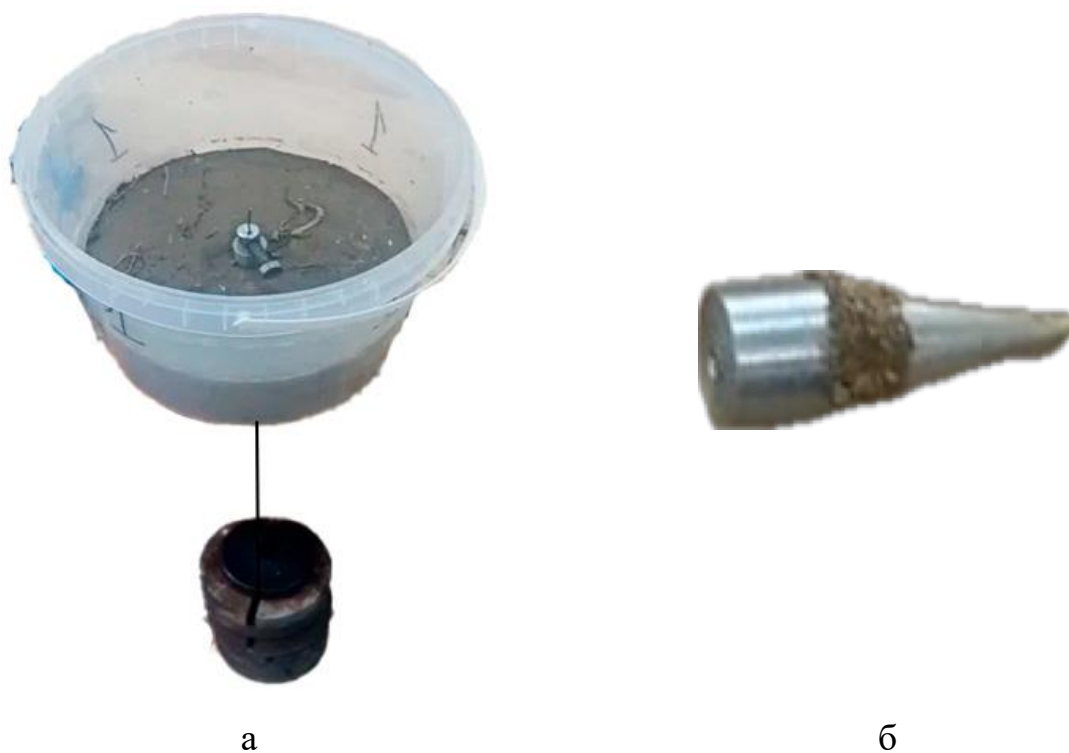
После достижения влажности $W_0 = 0,10$ образец №3, представляющий собой почву, высушенную после переувлажнения (без замораживания), характеризуется большей высотой слоя $h = 0,06$ м (рисунок 5, б). Образец №2 (рисунок 5, а), подвергавшийся пяти циклам замораживания-оттаивания в переувлажнённом состоянии, имеет меньшую высоту слоя $h = 0,05$ м, что косвенно свидетельствует об увеличении плотности приблизительно на 20% относительно образца №3 (рисунок 5, а-б).



а – высохшая из состояния переувлажнения почва; б – почва после пяти циклов замораживание-размораживание

Рисунок 6 – Измерение высоты слоя (плотности) исследуемых образцов

Для экспериментального определения несущей способности почвы была разработана лабораторная установка (рисунок 7, а), включающая ёмкости для размещения почвенных образцов и нагруженный измерительный конус с диаметром основания 15 мм и углом при вершине 30° (рисунок 7, б).



а – емкость; б – нагруженный конус

Рисунок 7 – Общий вид лабораторной установки для проведения экспериментальной части

В ходе экспериментов на стальную проволоку с фиксатором, проходящую через конус, последовательно навешивались дополнительные грузы до достижения суммарной массы, при которой наблюдалось полное погружение измерительного конуса в почвенный образец (рисунок 8).



Рисунок 8 – Погружение измерительного конуса в почвенный образец

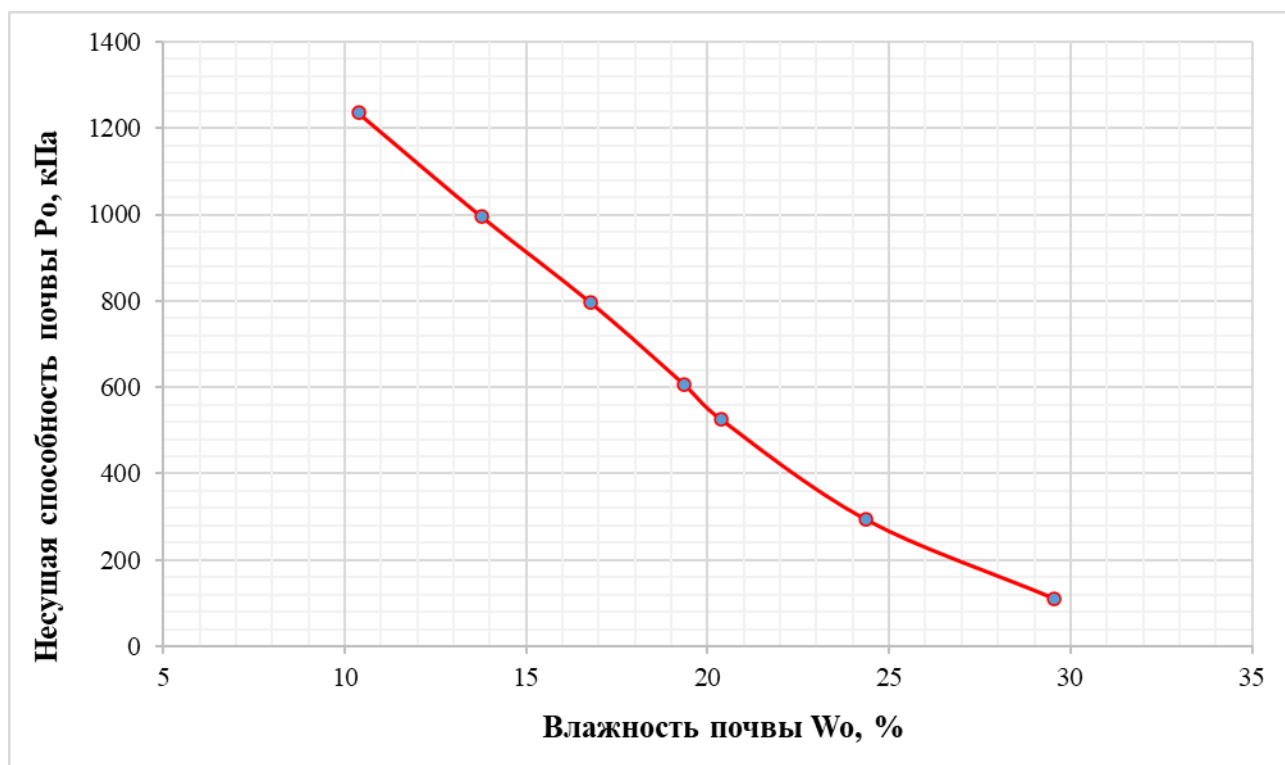
Для обеспечения возможности многократного использования измерительных ёмкостей и беспрепятственного перемещения нагруженной проволоки днище каждой ёмкости было оснащено технологическим отверстием, закрываемым герметизирующей пробкой. Влажность почвы W_0 определялась по показаниям электронных весов на основе уменьшения массы образца после его высушивания в сушильном шкафу (рисунок 9).



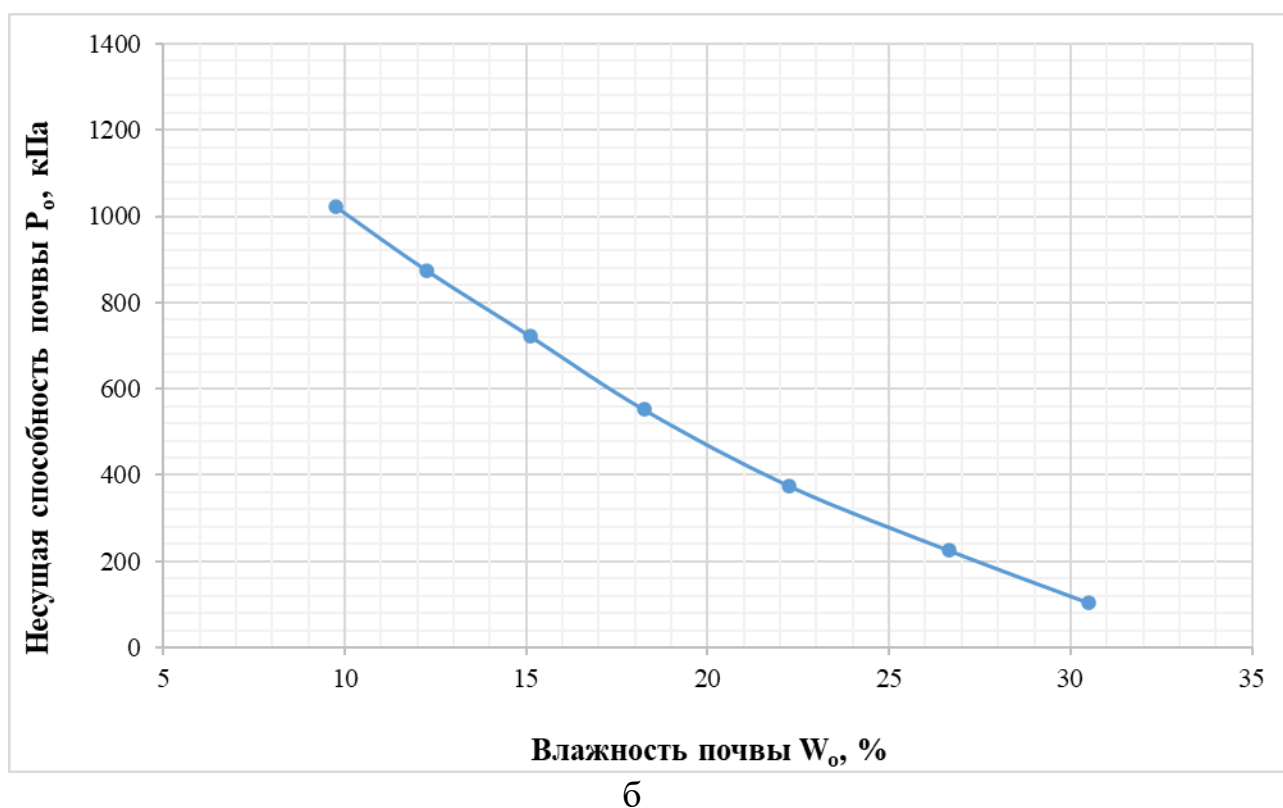
Рисунок 9 – Определение влажности почвенного образца с использованием электронных весов

Результаты. Обработка экспериментальных данных выполнялась с определением несущей способности почвы P_0 как величины удельного давления, соответствующего моменту полного погружения измерительного конуса в исследуемый образец.

Сравнительные результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей на рисунке 10.



а



а – образец №2; б – образец №3

Рисунок 10 – Зависимости изменения несущей способности P_0 кПа почвенных образцов от влажности почвы W_0 %

Образец №3 соответствует условиям летнего периода и представляет собой почву, высушенную после переувлажнения (без циклов замораживания-оттаивания). Образец №2 представляет собой почву, высушенную после переувлажнения, но предварительно подвергнутую пяти циклам замораживания-оттаивания.

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что применение технологии упрочнения поверхности передвижения за счёт использования циклов замораживания-оттаивания в условиях переувлажнения обеспечивает увеличение несущей способности почвы P_0 при её высушивании до влажности $W_0 = 10\%$ приблизительно на 25% по сравнению с летним вариантом.

Кроме того, установлено, что формирование более плотной структурной организации почвы в поверхностном слое пути передвижения (относительно летнего варианта) позволяет прогнозировать снижение интенсивности падения несущей способности при проведении кругового полива. Данное обстоятельство обусловлено тем, что уплотнённый грунт характеризуется меньшей склонностью к размоканию при увлажнении.

Для количественной оценки снижения несущей способности P_0 в процессе полива были проведены исследования. На высушенные до влажности $W_0 = 10\%$ образцы осуществлялось воздействие поверхностного слоя воды толщиной 5 мм, добавляемого каждую минуту в течение 10 минут. Указанный режим позволял воспроизвести условия полива нормой $m_m = 50 \text{ мм}$ (500 м³/га) для крайней опоры ходовой системы с номером $N = 10$.

В ходе заключительного эксперимента установлено следующее. Для образца №3 (летний вариант) зафиксировано снижение несущей способности с начального значения $P_0(W_0 = 10\%) = 1010 \div 1020 \text{ кПа}$ до 330...340 кПа после моделирования полива. Для образца №2 (пять циклов замораживания-оттаивания) начальное значение $P_0(W_0 = 10\%)$ составило 1250 кПа, а после полива снизилось до 530...540 кПа.

На основании полученных данных сделан вывод, что использование предлагаемой технологии позволяет повысить допустимое удельное давление на почву q при проведении полива максимальной нормой 500 м³/га в

$\frac{530 \div 540}{320 \div 340} = 1,59 \div 1,61$ раза относительно базового (летнего) варианта, что

соответствует превышению в 6,62...6,75 раза относительно серийного норматива $q = 80$ кПа.

Обсуждение. Полученные в ходе эксперимента результаты позволяют пересмотреть сложившиеся представления о предельно допустимом удельном давлении ходовых систем многоопорных дождевальных машин на почву. Действующие нормативы ориентированы на традиционные технологии движения без целенаправленного упрочнения поверхности передвижения. Однако, как показали исследования, применение дискового заравнивающего устройства в сочетании с межсезонной подготовкой колеи с использованием циклов замораживания-размораживания открывает возможность многократного (в 6,6...6,8 раза) превышения этого норматива без негативных экологических последствий.

Важно подчеркнуть, что указанные преимущества напрямую связаны с конструктивными особенностями дождевальных машин «Фрегат» и «Кубань-ЛК1», а также подобного типа машин. Данные машины эксплуатируются, как правило, на крупных севооборотных массивах с тяжёлыми суглинистыми и глинистыми почвами, где естественное восстановление структуры происходит медленно. Круговая схема движения предопределяет постоянное использование одних и тех же технологических колес, что в серийном варианте приводит к прогрессирующему их заглублению. Предлагаемый метод предзимней подготовки позволяет превратить недостаток (многократное нагружение) в преимущество: именно повторяемость проходов и возможность заполнения колеи почвой с последующим промораживанием создают условия для интенсивной структурной перестройки, которая невозможна при разовом воздействии.

Следует также отметить, что повышение допускаемого удельного давления до 530–540 кПа в условиях полива позволяет использовать колёсные движители с шириной профиля на 20...25 % меньше серийной. Это даёт возможность снизить металлоёмкость ходовой части, уменьшить

сопротивление качению и, как следствие, сократить энергозатраты на передвижение машины. Для «Фрегата» с числом опор 10...12 и «Кубань-ЛК1» с аналогичными параметрами суммарный эффект может выражаться в снижении расхода электроэнергии и воды на 8...12% за сезон, что подтверждается данными по влиянию ширины колеса на сопротивление перекачиванию на уплотнённых грунтах.

Ограничением проведённого исследования является лабораторный характер эксперимента. В полевых условиях на показатели несущей способности будут влиять такие факторы, как неоднородность почвенного покрова, глубина промерзания, количество циклов «оттепель-заморозок» в конкретную зиму, а также степень заполнения колеи почвой перед зимним периодом. Кроме того, исследование выполнено для одного типа почв (среднесуглинистые почвы АО «Озёры» Московской области). Для распространения результатов на другие регионы (например, с более тяжёлыми глинистыми почвами или с лёгкими супесчаными) потребуется проведение дополнительных экспериментов. Также нуждаются в уточнении оптимальное количество циклов замораживания-размораживания и минимально допустимая влажность почвы в момент начала промораживания.

Для хозяйств, эксплуатирующих «Фрегат» и «Кубань-ЛК1» на суглинистых почвах, рекомендуется следующий технологический приём: по окончании поливного сезона произвести заполнение образовавшейся колеи рыхлой почвой (например, с помощью дискового заравнивателя), обеспечить переувлажнение этой зоны (естественными осадками или остаточным поливом) и оставить в таком состоянии на зимний период. Многократное естественное замораживание и оттаивание в течение зимы приведёт к эффекту, аналогичному лабораторному, и к началу следующего сезона поверхность передвижения будет иметь повышенную несущую способность. При этом капитальных затрат на модернизацию машин не требуется – меняется только регламент эксплуатации и межсезонного обслуживания.

Выводы. В результате проведённых теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные выводы.

Научно обоснована возможность повышения несущей способности почвы в межсезонный период путём использования многократных циклов замораживания-оттаивания при переувлажнённом состоянии почвенного массива, находящегося в заполненной технологической колее. Установлено, что пять циклов замораживания-оттаивания обеспечивают увеличение несущей способности, высушенной до влажности $W_0 = 10\%$ почвы приблизительно на 25% по сравнению с летним вариантом (без замораживания).

Разработан способ межсезонной (предзимней) подготовки поверхности передвижения ходовых систем дождевальных машин, направленный на снижение глубины почвенной деформации и повышение эффективности эксплуатации широкозахватной дождевальной техники. Показано, что при моделировании полива нормой 500 м³/га несущая способность почвы, обработанной по предложенной технологии (пять циклов замораживания-оттаивания), снижается до 530...540 кПа, что в 1,59...1,61 раза превышает соответствующий показатель для базового (летнего) варианта и в 6,62...6,75 раза – нормативное значение 80 кПа.

Предложенный способ рекомендуется к применению при орошении площадей, предназначенных для возделывания многолетних трав, а также для межсезонной подготовки поверхности передвижения широкозахватной многоопорной дождевальной техники, включая машины кругового типа «Фрегат» и «Кубань-ЛК1».

Практическая реализация разработанной технологии позволяет повысить допустимое удельное давление ходовых систем на почву без ухудшения экологического состояния орошаемого участка, уменьшить ширину профиля колёсных движителей, снизив тем самым материалоёмкость и энергетические затраты на передвижение, а также сократить глубину остаточной почвенной

деформации и предотвратить образование переувлажнённых зон, негативно влияющих на плодородие возделываемых земель.

Таким образом, внедрение предложенного способа межсезонной подготовки поверхности передвижения способствует повышению эффективности применения многоопорной дождевальная техники и снижению экологических последствий для орошаемых агроландшафтов.

Литература

1. Агейкин Я. С. «Вездеходные колесные и комбинированные движители». М., «Машиностроение», 1972, 184 стр.
2. Анализ зарубежных разработок по повышению проходимости многоопорных дождевальных машин / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, Е. Ю. Евсеев, А. А. Ахтямов // Вестник Государственного социально-гуманитарного университета. – 2019. – № 3(35). – С. 57-62. – EDN DFJRQI.
3. Андреева, Е. В. Повышение тягово-сцепных свойств ходовых систем широкозахватных дождевальных машин кругового действия "Фрегат" / Е. В. Андреева // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2010. – № 4. – С. 1056. – EDN MWIGPB.
4. Вольская, Н. С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации : специальность 05.05.03 "Колесные и гусеничные машины" : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / Вольская Наталья Станиславовна. – Москва, 2008. – 32 с. – EDN NKKNPN.
5. Вялов С.С. Реологические основы механики грунтов: Учеб. пособие для строительных вузов. – М.: Высшая школа, 1978. – 447 с., ил.
6. Гуськов, А. В. Тягово-сцепные свойства и проходимость колесных машин по грунтам со слабой несущей способностью / А. В. Гуськов // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия В: Прикладные науки. Промышленность. – 2008. – № 2. – С. 7-15. – EDN UYZXSJ.

7. Евсеев, Е. Ю. К повышению производительности многоопорных дождевальных машин кругового действия на склоновых участках / Е. Ю. Евсеев, А. И. Рязанцев // Вестник мелиоративной науки. – 2024. – № 1. – С. 18-22. – EDN BAVNNE.
8. Журавлева, Л. А. Снижение воздействия ходовых систем дождевальных машин на почву / Л. А. Журавлева // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 5. – С. 82-87. – DOI 10.28983/asj.y2020i5pp82-87. – EDN ZMJYFU.
9. К проблеме уплотнения почвы ходовыми системами многоопорной дождевальной машины "Кубань-ЛК1" / А. И. Смирнов, А. И. Рязанцев, Е. Ю. Евсеев, А. О. Антипов // Всероссийская научно-практическая конференция, посвящённая 85-летию со дня рождения профессора Анатолия Михайловича Лопатина (1939-2007) "Инженерные решения для АПК", Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 13 ноября 2024 года. – Рязань, 2024. – С. 46-50. – EDN WSSSKO.
10. Математическая модель колебания в почвогрунтах под воздействием лесных машин / С. М. Базаров, И. А. Барашков, А. И. Никифорова, А. М. Хахина // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2012. – № 198. – С. 86-95. – EDN REJXUL.
11. Направления совершенствования регулирующих устройств для многоопорных дождевальных машин кругового действия типа "Кубань-ЛК1" / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, Е. Ю. Евсеев, А. И. Смирнов // Современное состояние, приоритетные задачи и перспективы развития аграрной науки на мелиорированных землях : Материалы международной научно-практической конференции, Тверь, 25 сентября 2020 года. Том Часть 2. – Тверь: Тверской государственный университет, 2020. – С. 155-159. – EDN FTKPLE.
12. Нино, Т. П. 277. СТО АИСТ 11. 1-2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей: СТО АИСТ 11. 1-2010.-Москва, 2012.-54 с.- (Стандарт организации). Шифр *Росинформагротех / Т. П. Нино //

Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2013. – № 1. – С. 277.

13. Оценка параметров ходовой системы "Кубань-ЛК1" при заравнивании колеи / А. И. Рязанцев, А. Н. Зазуля, Е. Ю. Евсеев [и др.] // Наука в центральной России. – 2023. – № 1(61). – С. 116-123. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-1-116-123. – EDN QERVKM.

14. Оценка энергетических показателей усовершенствованного привода многоопорных дождевальных машин, типа «Кубань-ЛК1» / А. И. Рязанцев, А. Н. Зазуля, Е. Ю. Евсеев, А. О. Антипов // Наука в центральной России. – 2023. – № 6(66). – С. 62-70. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-6-62-70. – EDN WXSNDX.

15. Повышение опорных свойств многоопорной машины "Кубань-ЛК1" / А. И. Рязанцев, А. Н. Зазуля, Е. Ю. Евсеев [и др.] // Наука в центральной России. – 2022. – № 6(60). – С. 35-41. – DOI 10.35887/2305-2538-2022-6-35-41. – EDN AFIZJD.

16. Смирнов, А. И. Оценка угла атаки заравнивающего устройства многоопорной дождевальной машины / А. И. Смирнов, А. И. Рязанцев, Е. Ю. Евсеев // Вестник мелиоративной науки. – 2023. – № 2. – С. 29-33. – EDN FOUPFG.

17. Хитров Е. Г., Хахина А. М., Лухминский В. А., Казаков Д. П. Исследование связи конусного индекса и модуля деформации различных типов грунтов // Resources and Technology. 2017. Т. 14, № 4. С. 1-16.

18. Ходовые системы широкозахватных дождевальных машин / Л. А. Журавлева, О. М. Кузина, М. В. Карпов [и др.]. – Москва : Российский государственный аграрный университет - МСХА им. К.А. Тимирязева, 2023. – 150 с. – ISBN 978-5-00207-258-3. – EDN KUQKSQ.

19. Reducing Energy Costs in Sprinkler Machine Operation / A. Ryazantsev, A. Smirnov, E. Evseev [et al.] // Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture. Volume 1 : Conference Proceedings, Stavropol, Russia Samarkand, Uzbekistan, 05–06 марта 2025 года. – Cham,

Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2026. – P. 59-68. – DOI 10.1007/978-3-031-94098-9_5. – EDN WLMHUI.

20. Technological Features of Irrigation and Assessment Indicators of Multibasic Irrigation Machines Running Systems Efficiency (on the Example of IM Kuban-LK1) / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, A. I. Smirnov [et al.] // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Vol. 8, No. 8 S3. – P. 404-406. – EDN GLITFM.

References

1. Ageikin Ya. S. "All-terrain wheeled and combined propellers." Moscow, "Mashinostroenie", 1972, 184 p.
2. Analysis of foreign developments to improve the cross-country capability of multi-support sprinkler machines / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, E. Yu. Evseev, A. A. Akhtyamov // Bulletin of the State Socio-Humanitarian University. – 2019. – № 3(35). – Pp. 57-62. – EDN DFJRQI.
3. Andreeva, E. V. Improving traction properties of running systems of wide-range circular sprinkler machines "Frigate" / E. V. Andreeva // Engineering and technical support of the agro-industrial complex. Abstract journal. – 2010. – No. 4. – p. 1056. – EDN MWIGPB.
4. Volskaya, N. S. Development of methods for calculating the traction characteristics of wheeled vehicles according to specified road and soil conditions in areas of operation : specialty 05.05.03 "Wheeled and tracked vehicles" : abstract of the dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences / Volskaya Natalia Stanislavovna. – Moscow, 2008. – 32 p. – EDN NKKNPN.
5. Vyalov S.S. Rheological foundations of soil mechanics: Textbook for construction universities. Moscow: Higher School, 1978. 447 p., ill.
6. Guskov, A.V. Traction properties and maneuverability of wheeled vehicles on soils with weak bearing capacity / A.V. Guskov // Bulletin of Polotsk State University. Series B: Applied Sciences. Industry. – 2008. – No. 2. – pp. 7-15. – EDN UYZXSJ.

7. Evseev, E. Yu. To increase the productivity of multi-support circular sprinkler machines on sloping areas / E. Yu. Evseev, A. I. Ryazantsev // Bulletin of Meliorative Science. – 2024. – No. 1. – PP. 18-22. – EDN BAVNNE.
8. Zhuravleva, L. A. Reducing the impact of running sprinkler systems on the soil / L. A. Zhuravleva // Agrarian Scientific Journal. – 2020. – No. 5. – pp. 82-87. – DOI 10.28983/asj.y2020i5pp82-87. – EDN ZMJYFU.
9. On the problem of soil compaction by running systems of the Kuban-LK1 multi-support sprinkler machine / A. I. Smirnov, A. I. Ryazantsev, E. Yu. Evseev, A. O. Antipov // All-Russian scientific and practical conference dedicated to the 85th anniversary of the birth of Professor Anatoly Mikhailovich Lopatin (1939-2007) "Engineering solutions for agriculture", Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, November 13, 2024. – Ryazan, 2024. – pp. 46-50. – EDN WSSSKO.
10. S. M. Bazarov, I. A. Barashkov, A. I. Nikiforova, A.M. Khakhina, Mathematical model of koleization in soils under the influence of forest machinery // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy, 2012, No. 198, pp. 86-95, EDN REJXUL.
11. Riazantsev A. I., Antipov A. O., Evseev E. Yu., Smirnov A. I. Directions of improvement of regulating devices for multi-support circular sprinkler machines of the Kuban-LK1 type // Current state, priority tasks and prospects for the development of agrarian science on reclaimed lands : Proceedings of the international scientific and practical conference, Tver, 25 September 2020. Volume Part 2. Tver: Tver State University, 2020. pp. 155-159. EDN FTKPLE.
12. Nino, T. P. 277. HUNDRED STORK 11. 1-2010. Testing of agricultural machinery. Sprinkler machines and installations. Methods for evaluating functional indicators: STO STORK 11. 1-2010.-Moscow, 2012.-54 p.-(Organization standard). Cipher *Rosinformagrotech / T. P. Nino // Engineering and technical support of the agro-industrial complex. Abstract journal, 2013– No. 1, pp. 277-13. Evaluation of the parameters of the Kuban-LK1 running system during track leveling / A. I. Ryazantsev, A. N. Zazulya, E. Yu. Evseev [et al.] // Science in

Central Russia. – 2023. – № 1(61). – Pp. 116-123. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-1-116-123. – EDN QERBKM.

14. Assessment of the energy performance of the improved drive of multi-support sprinkler machines, such as "Kuban-LK1" / A. I. Ryazantsev, A. N. Zazulya, E. Yu. Evseev, A. O. Antipov // Science in central Russia. – 2023. – № 6(66). – Pp. 62-70. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-6-62-70. – EDN WXSNDX.

15. Improving the supporting properties of the Kuban-LK1 multi-bearing machine / A. I. Ryazantsev, A. N. Zazulya, E. Yu. Evseev [et al.] // Science in central Russia. – 2022. – № 6(60). – Pp. 35-41. – DOI 10.35887/2305-2538-2022-6-35-41. – EDN AFIZJD.

16. Smirnov, A. I. Estimation of the angle of attack of the leveling device of a multi-support sprinkler machine / A. I. Smirnov, A. I. Ryazantsev, E. Yu. Evseev // Bulletin of Meliorative Science. – 2023. – No. 2. – pp. 29-33. – EDN FOUPFG.

17. Khitrov E. G., Khakhina A.M., Luhminsky V. A., Kazakov D. P. Investigation of the relationship between the cone index and the modulus of deformation of various types of soils // Resources and Technology. 2017. Vol. 14, No. 4. pp. 1-16.

18. Running systems of wide-reach sprinkler machines / L. A. Zhuravleva, O. M. Kuzina, M. V. Karpov [et al.]. - Moscow : Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev, 2023. – 150 p. - ISBN 978-5-00207-258-3. – EDN KUQKSQ.

19. Reducing Energy Costs in Sprinkler Machine Operation / A. Ryazantsev, A. Smirnov, E. Evseev [et al.] // Innovations in Sustainable Agricultural Systems, Agriculture 4.0 and Precision Agriculture. Volume 1 : Conference Proceedings, Stavropol, Russia Samarkand, Uzbekistan, 05–06 марта 2025 года. – Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2026. – P. 59-68. – DOI 10.1007/978-3-031-94098-9_5. – EDN WLMHUJ.

20. Technological Features of Irrigation and Assessment Indicators of Multibasic Irrigation Machines Running Systems Efficiency (on the Example of IM Kuban-LK1) / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, A. I. Smirnov [et al.] // International

Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering. – 2019. – Vol. 8,
No. 8 S3. – P. 404-406. – EDN GLITFM.

© *Рязанцев А.И., Смирнов А.И., Евсеев Е.Ю., Малько И.В., Зубков Ф.В.,
Артюшин С.А. 2026. International agricultural journal, 2026, № 3, 57-83.*