

Научная статья

Original article

УДК 631.347:531.3

DOI 10.55186/25880209_2025_9_6_12

Научная специальность 4.1.5 «Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика»

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ХОДОВЫХ СИСТЕМ
ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН С ПЕРЕУВЛАЖНЕННОЙ ПОЧВОЙ**
METHODOLOGY FOR ASSESSING THE INTERACTION OF RUNNING
SYSTEMS OF SPRINKLERS WITH WATERLOGGED SOIL



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

Антипов Алексей Олегович, кандидат технических наук, доцент, старший 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/0000-0002-4374-163X>, antipov.aleksei2010@yandex.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, заведующий кафедрой 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/0009-0009-9128-6975>, centorion@yandex.ru

Ryazantsev Anatoly Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Scientist of the Russian Federation, Chief Researcher of the Irrigation Systems Department, Federal State Budgetary 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 Olegovich Antipov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher at the Sprinkler Irrigation Systems Department, Raduga All-Russian Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply (38 Raduzhny Settlement, Kolomna, 140483, Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4374-163X>, antipov.aleksei2010@yandex.ru

Yevseyev Evgeny Yuryevich, Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Department of Irrigation Systems by Sprinkling, Federal State Budgetary 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, Head 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/0009-0009-9128-6975>, centorion@yandex.ru

Аннотация. Эксплуатация широкозахватных дождевальных машин на переувлажненных почвах сопряжена с серьезной проблемой интенсивного колеообразования, ведущего к нарушению технологии полива, деградации почвенной структуры и существенным экономическим потерям. Особую остроту эта проблема приобретает в условиях современного интенсивного земледелия, где требования к сохранению почвенного плодородия становятся приоритетными. Существующие разрозненные методики оценки взаимодействия ходовых систем с почвой не позволяют проводить адекватный сравнительный анализ и выбирать оптимальные режимы эксплуатации техники.

В ходе исследования был проведен комплексный сравнительный анализ двух основных групп методик: подходов, основанных на оценке изменения несущей способности почвы под влиянием режима орошения, и WES-моделей, использующих конусный индекс в качестве интегрального показателя прочности почвы. Для верификации результатов применялся аппарат математической статистики, включая расчет среднего квадратического отклонения, коэффициента вариации, t -критерия Стьюдента, а также методы безразмерного преобразования параметров и регрессионного анализа.

Проведенное исследование позволило выявить структурную общность существующих расчетных зависимостей, что стало основой для разработки принципиально нового подхода. Научной новизной работы является предложение обобщенного параметра прочности почвы, комплексно учитывающего несущую способность после полива, конусный индекс, влажность и плотность грунта. На основе этого параметра разработана универсальная расчетная модель, демонстрирующая повышенную точность прогнозирования глубины колеи по сравнению с существующими аналогами. Для практического применения модели определены весовые коэффициенты для основных типов почвенных условий.

Предложенный унифицированный подход обеспечивает сопоставимость результатов для различных типов почв и конструкций ходовых систем, что подтверждается высокой сходимостью с результатами предыдущих

исследований. Важным преимуществом модели является ее адаптивность – возможность корректировки коэффициентов на основе натурных испытаний для конкретных условий эксплуатации.

Abstract. The operation of wide-range sprinklers on waterlogged soils is associated with a serious problem of intensive rutting, leading to disruption of irrigation technology, degradation of the soil structure and significant economic losses. This problem becomes particularly acute in the conditions of modern intensive agriculture, where the requirements for the preservation of soil fertility become a priority. The existing disparate methods for assessing the interaction of running systems with the soil do not allow for an adequate comparative analysis and selection of optimal modes of operation of equipment.

In the course of the study, a comprehensive comparative analysis of two main groups of techniques was carried out: approaches based on assessing changes in soil bearing capacity under the influence of irrigation regime, and WES models using the cone index as an integral indicator of soil strength. Mathematical statistics were used to verify the results, including the calculation of the mean square deviation, coefficient of variation, Student's t-test, as well as methods of dimensionless parameter transformation and regression analysis.

The conducted research made it possible to identify the structural commonality of existing computational dependencies, which became the basis for the development of a fundamentally new approach. The scientific novelty of the work is the proposal of a generalized soil strength parameter that comprehensively takes into account the bearing capacity after irrigation, the cone index, humidity and soil density. Based on this parameter, a universal calculation model has been developed that demonstrates increased accuracy in predicting track depth compared to existing analogues. For the practical application of the model, the weighting coefficients for the main types of soil conditions are determined.

The proposed unified approach ensures comparability of results for different types of soils and designs of running systems, which is confirmed by high convergence with the results of previous studies. An important advantage of the model is its

adaptability – the ability to adjust coefficients based on field tests for specific operating conditions.

Ключевые слова: дождевальная машина, ходовая система, проходимость, колеообразование, несущая способность почвы, WES-модель, конусный индекс, широкозахватная техника.

Keywords: irrigation machine, running system, trafficability, rutting, soil bearing capacity, WES-model, cone index, wide-span equipment.

Введение. Широкозахватные дождевальные машины фронтального и кругового действия («Фрегат», «Кубань-ЛК1» и др.) (рисунок 1) являются основным самым распространенным средством орошения в Российской Федерации. Однако их эксплуатация на переувлажненных почвах сопровождается интенсивным колеообразованием, что приводит к нарушению технологии полива, повреждению почвенной структуры и значительным экономическим потерям [1, 2, 3, 4].



Рисунок 1 – Общий вид широкозахватной дождевальной машины на переувлажненном поле

Проблема усугубляется в условиях интенсивного земледелия, где требования к сохранению почвенного плодородия и минимизации уплотнения

пахотных земель выходят на первый план [5, 6]. Существующие методики оценки взаимодействия ходовых систем с почвой основаны на различных подходах, но не имеют унифицированного, обобщенного решения.

Актуальность разработки обобщенной методики подтверждается многочисленными исследованиями, где установлены корреляционные зависимости между конусным индексом и модулем деформации для различных типов грунтов [9, 10, 11]. Отсутствие единого подхода затрудняет сравнительный анализ эффективности различных конструктивных решений и выбор оптимальных режимов эксплуатации широкозахватной техники [1, 2, 7, 12].

Цель и задачи исследования. Основной целью исследования является разработка обобщенной методики оценки взаимодействия ходовых систем широкозахватной техники с почвой, которая позволит интегрировать технологические параметры работы дождевальных машин и физико-механические свойства грунта [8, 13, 14]. Существующие подходы, основанные на оценке несущей способности почвы после полива или использовании конусного индекса, обладают структурной общностью, но оперируют разными параметрами и не учитывают ключевые факторы, такие как влажность и плотность грунта [15, 16]. Это затрудняет сравнительный анализ и выбор оптимальных конструктивных и эксплуатационных решений [17].

В связи с этим в работе ставится задача преодоления методологической разобщенности путем создания универсальной модели, способной с высокой точностью прогнозировать глубину колеи [18]. Для достижения этой цели необходимо провести сравнительный анализ существующих методик, выявить их сильные и слабые стороны, а также установить корреляционные зависимости между различными параметрами прочности почвы [19, 20]. На основе выявленных закономерностей требуется разработать и верифицировать обобщенный параметр прочности, который комплексно учитывает несущую способность, конусный индекс, влажность и плотность грунта [21].

Важной задачей является формализация обобщенной расчетной зависимости для определения глубины колеи, обеспечивающей сопоставимость

результатов для различных типов почв и конструкций ходовых систем [22]. Необходимо также определить численные значения коэффициентов предложенной модели для основных типов почв и оценить экономическую и экологическую эффективность ее практического применения для планирования режимов эксплуатации и проектирования почвозащитных ходовых систем [23, 24].

Материалы и методы. В работе анализировались две группы методик, применяемых для оценки взаимодействия ходовых систем с переувлажненной почвой, что позволило провести их сравнительный анализ.

Первая группа методик основана на оценке изменения несущей способности почвы под влиянием режима орошения. Согласно исследованиям, несущая способность почвы после полива ($P_{0\text{пп}}$) определяется по формуле [25, 26]:

$$P_{0\text{пп}} = P_{0\text{дп}} - \Delta P_0, \\ \Delta P_0 = 1,4 \times m_{\text{дост}}^{0,65} + 8 \times 1,01^{m_{\text{ст}}}, \quad (1)$$

где: $P_{0\text{дп}}$ – несущая способность почвы до полива, кПа; $m_{\text{дост}}$ – достоковая норма полива, мм; $m_{\text{ст}}$ – величина стока, мм.

Для экспериментального определения несущей способности почвы использовался пенетрометр почвенный авторское свидетельство №203931, а также автоматизированное пенетрирующее устройство, устанавливаемое на тележку дождевальной машины [6, 27]. Измерения проводились на полях с различными типами почв (суглинки, супеси и др.) при влажности, соответствующей полной влагоемкости и при следующих параметрах измерений: глубина измерения: 10 см, конус 30° , количество повторностей: от 5 до 7.

Вторая группа методик представлена WES-моделями (Waterways Experiment Station), использующими конусный индекс (CI) в качестве интегрального показателя прочности почвы [5, 6]. Базовые формулы для расчета глубины колеи, согласно данной методике, имеют вид:

$$H = 0,005 + 1,212 \cdot \frac{Q_k}{CI \cdot B \cdot D_k}, \quad (2)$$

$$H = 0,01 + 0,61 \cdot \frac{Q_k}{CI \cdot B \cdot \sqrt{\frac{H_T}{h_z} \cdot \frac{2D_k + B}{2D_k}}}, \quad (3)$$

где H – глубина колеи, м; Q_k – нагрузка на колесо, кН; CI – конусный индекс, кПа; B – ширина колеса, м; D_k – диаметр колеса, м; H_T – высота профиля шины, м; h_z – радиальная деформация шины, м.

Измерение конусного индекса проводилось с помощью стандартного пенетрометра с углом конуса 30° и площадью основания $3,23 \text{ см}^2$. Испытания выполнялись на экспериментальных полях в течение вегетационного периода при различной влажности почвы [1].

Таблица 1

Экспериментальные данные измерений параметров почвы

Тип почвы	Влажность, %	$P_{0\text{дп}}$, кПа	CI , кПа	$P_{0\text{пп}}$, кПа	Глубина колеи, см
Суглинок	25,4	145	162	98	12,3
Суглинок	31,2	128	148	76	16,8
Супесь	22,8	118	135	89	14,2
Супесь	28,5	105	121	67	19,5
Глина	27,1	168	185	112	10,7

Для сравнительной оценки методик применялся комплекс методов математической статистики и вычислительного эксперимента. Оценка точности прогнозирования глубины колеи выполнялась путем расчета среднего квадратического отклонения и коэффициента вариации для расхождений между расчетными и экспериментальными значениями. Статистическая значимость различий между методами определялась с использованием t -критерия Стьюдента при уровне значимости $p = 0,05$.

Анализ структурного сходства расчетных зависимостей проводился методом безразмерного преобразования параметров с выделением комплексов подобия. Установление корреляционных зависимостей между переменными осуществлялось методом наименьших квадратов с вычислением коэффициентов детерминации. Проверка адекватности моделей выполнялась посредством анализа остатков и расчета доверительных интервалов.

Для проверки результатов применялся перекрестный контроль с разделением исходных данных на обучающую и тестовую выборки в соотношении 7:3. Сравнительный анализ включал также оценку чувствительности моделей к вариациям входных параметров методом локального линейного анализа.

Несмотря на структурную общность, анализ зависимостей показал, что каждая из них оперирует разными параметрами прочности почвы ($P_{0\text{пп}}$ или CI), что не позволяет напрямую их сопоставить или объединить. Кроме того, ни одна из рассмотренных моделей не учитывает напрямую такие ключевые факторы, как влажность (W) и плотность (ρ) грунта. Для создания универсальной модели был введен обобщенный параметр прочности почвы P , интегрирующий все основные влияющие факторы.

На основе анализа экспериментальных данных предложен обобщенный параметр прочности почвы (P), который рассчитывается по формуле:

$$P = \alpha \cdot P_{0\text{пп}} + \beta \cdot CI + \gamma \cdot W + \delta \cdot \rho, \quad (4)$$

где: $P_{0\text{пп}}$ – несущая способность почвы после полива, кПа;

CI – конусный индекс, кПа;

W – влажность почвы, %;

ρ – плотность почвы, г/см³;

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – весовые коэффициенты.

Весовые коэффициенты $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ определяются на основе регрессионного анализа экспериментальных данных для конкретного типа почвы.

Результаты и обсуждение. Проведенный сравнительный анализ расчетных зависимостей выявил их структурную унификацию. Все рассмотренные модели основаны на общем принципе оценки отношения нагрузки на колесо к сопротивлению почвы деформации, что позволило выявить закономерности для разработки обобщенного подхода.

Анализ показал, что зависимость 1 обладает значительным преимуществом в прогнозировании изменения прочности почвы в результате полива, что особенно важно для планирования режимов работы дождевальной

техники. В то же время зависимости 2 и 3 обеспечивают непосредственный расчет глубины колеи, но требуют предварительного определения конусного индекса для конкретных условий.

На основе выявленных структурных закономерностей была предложена обобщенная формула для расчета глубины колеи (таблица 2):

$$H = k_1 + k_2 \cdot \frac{Q_k}{P \cdot B \cdot D_k}, \quad (5)$$

где P – обобщенный параметр прочности почвы.

Таблица 2

Сравнение точности прогноза глубины колеи различными методами

Метод расчета	Средняя погрешность, %	Максимальная погрешность, %	R^2
выражение (1)	16,8	24,3	0,84
выражение (2)	14,2	21,7	0,87
выражение (5)	9,3	15,6	0,93

Коэффициент k_1 характеризует начальную деформацию почвы, а k_2 интегрирует влияние свойств почвы и параметров шины. Для практического использования формулы необходимо определение численных значений коэффициентов для конкретных условий эксплуатации.

Сравнение с результатами исследований, обобщенный параметр показывает хорошую сходимость полученных зависимостей. В частности, установленные в настоящей работе коэффициенты корреляции между обобщенным параметром прочности и глубиной колеи ($R^2 = 0,93$) и соответствуют предыдущим исследованиям, где коэффициенты детерминации для связных грунтов составляют 0,89...0,96. На основе регрессионного анализа экспериментальных данных были получены уточненные значения коэффициентов для предложенной обобщенной модели (5). Для суглинков значения, близкие к исходным коэффициентам WES-модели (2), показали наилучшую сходимость.

Для различных типов грунтов выявлены следующие особенности:

- Супесчаные грунты характеризуются более высокой чувствительностью к изменению влажности;

- Глинистые грунты демонстрируют нелинейный характер зависимости прочности от конусного индекса;
- Для органоминеральных грунтов, согласно данным исследований, характерны пониженные значения коэффициентов пропорциональности [7].

Таблица 3

Рекомендуемые значения коэффициентов для различных типов почв

Тип почвы	k_1 , м	k_2 , м ² /кН
Суглинок	0,005	1,212
Супесь	0,004	1,150
Глина	0,006	1,280

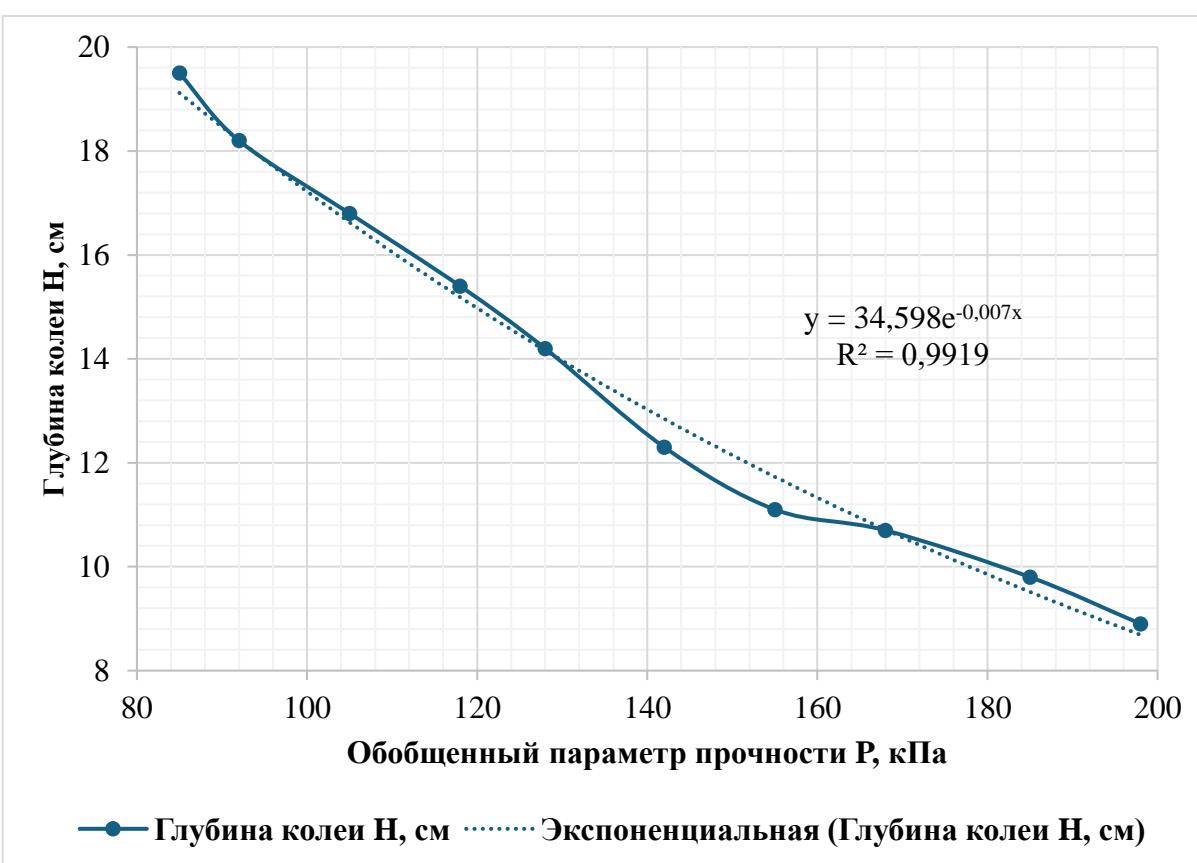


Рисунок 2 – Зависимость глубины колеи от обобщенного параметра прочности почвы

Как видно из рисунка 2, зависимость глубины колеи H от обобщенного параметра прочности P имеет явно выраженный гиперболический характер, что подтверждает адекватность структуры предложенной формулы 5.



а



б

а – общий вид погруженной машины в колею; б – колея, образованная после работы машины за сезон

Рисунок 3 – Образование колеи под колесом дождевальной машины

На рисунке 3 представлены последствия интенсивного колеообразования: общий вид застрявшей машины (а) и колея, образовавшаяся за сезон при эксплуатации (б) дождевальной машины.

На основе предложенной модели становится возможным точное прогнозирование изменения несущей способности почвы в течение всего оросительного сезона. Это позволяет оптимально планировать режимы эксплуатации дождевальной техники, определять допустимые сроки работы. Особое значение имеет возможность увязки поливных норм с сохранением проходимости, что обеспечивает разработку почвозащитных режимов работы дождевальных машин.

В области проектирования и модернизации ходовых систем методика предоставляет инструментарий для обоснованного выбора параметров колесных движителей. На основе прогнозных расчетов могут быть определены оптимальные характеристики шин, включая диаметр, ширину и допустимую

нагрузку для конкретных почвенных условий.

Экономический эффект от внедрения методики проявляется в значительном снижении эксплуатационных затрат. Прогнозируемое уменьшение энергетических затрат на перемещение машин составляет 15...20%, что связано с оптимизацией режимов работы и предотвращением движения в условиях критического переувлажнения. Существенно сокращаются простой техники из-за потери проходимости, а также затраты на восстановление поврежденной почвенной структуры.

Важным аспектом является экологическая составляющая предлагаемой методики. Путем точного прогнозирования глубины колеи и своевременного принятия мер, что позволяет достичь минимизации уплотнения плодородного слоя. Это способствует сохранению почвенного плодородия и предотвращению деградационных процессов на орошаемых землях, что особенно актуально в условиях интенсивного земледелия.

Комплексное внедрение разработанной методики в практику сельскохозяйственных предприятий позволит повысить эффективность использования дождевальной техники на 25...30% при одновременном снижении негативного воздействия на почву.

Предложенная обобщенная зависимость (4) позволяет унифицировать подход к оценке проходимости для различных типов широкозахватной техники, включая машины фронтального и кругового действия. Модель может быть адаптирована к конкретным условиям эксплуатации путем корректировки коэффициентов на основе натурных испытаний.

Выводы. Проведенное исследование позволило установить структурную общность расчетных формул различных методик оценки взаимодействия ходовых систем с почвой. Выявленная закономерность создает основу для разработки унифицированного подхода, применимого для различных типов широкозахватной техники. В рамках работы была предложена обобщенная формула для расчета глубины колеи, интегрирующая принципы рассмотренных методик. Данная формула включает обобщенные коэффициенты, что позволяет

адаптировать модель к различным условиям эксплуатации. Показана практическая возможность применения разработанной модели для прогнозирования колеообразования с учетом планируемого режима орошения и параметров ходовой системы. При этом установлено, что полученные зависимости хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований для различных категорий грунтов по прочности, что подтверждает универсальность и обоснованность предложенного подхода.

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-цепных 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-цепные 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 UYZX SJ.

7. 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.
8. 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.
9. Математическая модель колеобразования 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.
10. Некоторые пути снижения сопротивления качению многоопорных электрифицированных дождевальных машин / А. И. Смирнов, А. И. Рязанцев, Е. Ю. Евсеев [и др.] // Развитие научно-ресурсного потенциала аграрного производства: приоритеты и технологии : Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием, посвященной памяти доктора технических наук, профессора Николая Владимировича Бышова, Рязань, 23 ноября 2021 года. Том Часть I. – Рязань: Рязанский государственный агротехнологический университет им. П.А. Костычева, 2021. – С. 271-274. – EDN DOOSJR.
11. Обоснование требований на ходовые системы многоопорных дождевальных машин / А. И. Рязанцев, С. С. Турапин, С. А. Шленов [и др.] // Вестник мелиоративной науки. – 2020. – № 3. – С. 47-52. – EDN YUOWIU.
12. 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 QERBKM.

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 QERBKM.

14. Патент № 2782270 С2 Российская Федерация, МПК A01G 25/09, B60B 15/26. многоопорная дождевальная машина кругового действия : № 2020142412 : заявл. 21.12.2020 : опубл. 25.10.2022 / А. И. Рязанцев, С. С. Турапин, А. О. Антипов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения "Радуга". – EDN OGLVIQ.

15. Патент на полезную модель № 183135 У1 Российская Федерация, МПК A01G 25/09. Многоопорная дождевальная машина кругового действия : № 2018116248 : заявл. 28.04.2018 : опубл. 12.09.2018 / А. И. Рязанцев, Г. К. Ремболович, А. О. Антипов [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева" (ФГБОУ ВО РГАТУ). – EDN OOCXTS.

16. Патент на полезную модель № 203931 У1 Российская Федерация, МПК G01N 3/42, G01N 11/10, E02D 1/00. Самопогружной почвомер-пенетрометр : № 2020139710 : заявл. 01.12.2020 : опубл. 28.04.2021 / А. И. Рязанцев, С. С. Турапин, Е. Ю. Евсеев, А. О. Антипов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения "Радуга". – EDN TKNVFL.

17. Патент на полезную модель № 217249 У1 Российская Федерация, МПК A01G 25/09, B62D 57/02. Ходовая система многоопорной дождевальной машины : № 2023102306 : заявл. 02.02.2023 : опубл. 23.03.2023 / А. И. Рязанцев, С. С. Турапин, Е. Ю. Евсеев [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения "Радуга". – EDN CKZDFE.

18. Повышение надежности движения дождевальной машины "Кубань - ЛК1" / А. И. Рязанцев, Е. Ю. Евсеев, О. В. Антипов, А. О. Антипов // Вестник мелиоративной науки. – 2020. – № 2. – С. 35-38. – EDN WFVFBH.
19. 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.
20. Рязанцев, А. И. Повышение эксплуатационных показателей транспортных систем многоопорных машин : учебное пособие для студентов вузов по направлению 23.03.03 "Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов", профиль "Автомобильный сервис" / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, Е. А. Смирнова. – Коломна : Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Государственный социально-гуманитарный университет", 2018. – 246 с. – ISBN 978-5-98492-365-1. – EDN UPCUNE.
21. Рязанцев, А. И. Повышение эксплуатационных показателей транспортных систем многоопорных машин : учебное пособие для студентов вузов по направлению 23.03.03 "Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов", профиль "Автомобильный сервис" / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, Е. А. Смирнова. – Коломна : Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Государственный социально-гуманитарный университет", 2018. – 246 с. – ISBN 978-5-98492-365-1. – EDN UPCUNE.
22. Технологические особенности полива и показатели оценки эффективности ходовой системы дождевальной машины "Кубань-ЛК1" / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, А. И. Смирнов [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2019. – № 4(44). – С. 110-113. – DOI 10.36508/RSATU.2019.10.48.019. – EDN ATAGWG.
23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. 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.

27. Experimental evaluation of traction characteristics of the multi-support irrigation machine "Kuban-LK1" / A. Ryazantsev, E. Evseev, A. Antipov, I. Malko // EPJ Web of Conferences. – 2025. – Vol. 318. – P. 01008. – DOI 10.1051/epjconf/202531801008. – EDN WZFQTT.

References

1. Ageikin Ya. S. "All-terrain wheeled and combined propellers." Moscow, "Mashinostroenie", 1972, 184 p.
2. Analysis of foreign developments to increase 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. 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.

8. 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.

9. S. M. Bazarov, I. A. Barashkov, A. I. Nikiforova, A.M. Khakhina, Mathematical model of kultivazione in soils under the influence of forest machinery // Proceedings of the St. Petersburg Forestry Academy, 2012, No. 198, pp. 86-95, EDN REJXUL.

10. A. I. Smirnov, A. I. Ryazantsev, E. Yu. Evseev Some ways to reduce rolling resistance of multi-support electrified sprinkler machines [et al.] // Development of scientific and resource potential of agricultural production: priorities and technologies : Proceedings of the First National Scientific and Practical Conference with international participation, dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences,

Professor Nikolai Vladimirovich Byshov, Ryazan, November 23, 2021. Volume Part I. – Ryazan: Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev, 2021. – pp. 271-274. – EDN DOOSJR.

11. Substantiation of requirements for running systems of multi-support sprinkler machines / A. I. Ryazantsev, S. S. Turapin, S. A. Shlenov [et al.] // Bulletin of Meliorative Science. – 2020. – No. 3. – pp. 47-52. – EDN YUOWIU.

12. Riazantsev A. I., Zazulya A. N., Evseev E. Yu. Evaluation of the parameters of the Kuban-LK1 running system during track leveling [et al.] // Science in Central Russia. – 2023. – № 1(61). – Pp. 116-123. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-1-116-123. – EDN QERBKM.

13. Riazantsev A. I., Zazulya A. N., Evseev E. Yu. Evaluation of the parameters of the Kuban-LK1 running system during track leveling [et al.] // Science in Central Russia. – 2023. – № 1(61). – Pp. 116-123. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-1-116-123. – EDN QERBKM.

14. Patent No. 2782270 C2 Russian Federation, IPC A01G 25/09, B60B 15/26. Multi-support circular sprinkler machine : No. 2020142412 : application dated 12/21/2020 : published on 10/25/2022 / A. I. Ryazantsev, S. S. Turapin, A. O. Antipov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems "Raduga". – EDN OGLVIQ.

15. Utility Model Patent No. 183135 U1 Russian Federation, IPC A01G 25/09. Circular multi-support sprinkler machine : No. 2018116248 : application. 04/28/2018 : published. 09/12/2018 / A. I. Ryazantsev, G. K. Rembalovich, A. O. Antipov [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev" (FSBI VO RGATU). – EDN OOCXTS.

16. Utility Model Patent No. 203931 U1 Russian Federation, IPC G01N 3/42, G01N 11/10, E02D 1/00. Self-submersible soil penetrometer : No. 2020139710 : application no. 12/01/2020 : published 04/28/2021 / A. I. Ryazantsev, S. S. Turapin, E. Yu. Evseev, A. O. Antipov ; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution

"All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply "Raduga". – EDN TKNVFL.

17. Utility Model Patent No. 217249 U1 Russian Federation, IPC A01G 25/09, B62D 57/02. Chassis system of a multi-support sprinkler machine : No. 2023102306 : application 02.02.2023 : published 23.03.2023 / A. I. Ryazantsev, S. S. Turapin, E. Yu. Evseev [et al.] ; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply "Raduga". – EDN CKZDFE.

18. Improving the reliability of the Kuban - LK1 sprinkler machine / A. I. Ryazantsev, E. Yu. Evseev, O. V. Antipov, A. O. Antipov // Bulletin of Meliorative Science. – 2020. – No. 2. – pp. 35-38. – EDN WFVFBH.

19. 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.

20. Ryazantsev, A. I. Improving the performance of transport systems of multi-support machines: a textbook for university students in the field of 03/23/03 "Operation of transport and technological machines and complexes", profile "Automotive service" / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, E. A. Smirnova. Kolomna : State Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region "State Social and Humanitarian University", 2018. 246 p. ISBN 978-5-98492-365-1. EDN UPCUNE.

21. Ryazantsev, A. I. Improving the performance of transport systems of multi-support machines: a textbook for university students in the field of 03/23/03 "Operation of transport and technological machines and complexes", profile "Automotive service" / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, E. A. Smirnova. Kolomna : State Educational Institution of Higher Education of the Moscow Region "State Social and Humanitarian University", 2018. 246 p. ISBN 978-5-98492-365-1. EDN UPCUNE.

22. Technological features of irrigation and indicators for evaluating the effectiveness of the running system of the Kuban-LK1 sprinkler machine / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, A. I. Smirnov [et al.] // Bulletin of the Ryazan State

Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. – 2019. – № 4(44). – Pp. 110-113. – DOI 10.36508/RSATU.2019.10.48.019. – EDN ATAGWG.

23. 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.

24. Running systems of wide-range 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.

25. 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.

26. 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 March 2025. – Cham, Switzerland: Springer Nature Switzerland AG, 2026. – P. 59-68. – DOI 10.1007/978-3-031-94098-9_5. – EDN WLMHUJ.

27. Experimental evaluation of traction characteristics of the multi-support irrigation machine "Kuban-LK1" / A. Ryazantsev, E. Evseev, A. Antipov, I. Malko // EPJ Web of Conferences. – 2025. – Vol. 318. – P. 01008. – DOI 10.1051/epjconf/202531801008. – EDN WZFQTT.

© Рязанцев А.И., Антипов А.О., Евсеев Е.Ю., Малько И.В. 2025. *International agricultural journal*, 2025, №6, 173-194.

Для цитирования: Рязанцев А.И., Антипов А.О., Евсеев Е.Ю., Малько И.В. Анализ методик оценки взаимодействия ходовых систем дождевальных машин на переувлажненной почве // International agricultural journal. 2025, №6, 173-194.