

Научная статья

Original article

УДК 631.347:531.3

DOI 10.55186/25880209_2025_9_6_4

Научная специальность 4.1.5 «Мелиорация, водное хозяйство и агрофизика»

**ОБОСНОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ
ШИРОКОЗАХВАТНЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН**
RATIONALE FOR MODERNIZING THE DRIVE SYSTEM OF WIDE-
CAPACITY IRRIGATION MACHINES



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

Турапин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, врио директора, ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения «Радуга» (140483, Россия, г. Коломна, городской округ Коломна, посёлок Радужный, 38), ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1198-2511>, prraduga@yandex.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

Ryazantsev Anatoly Ivanovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored
Scientist of the Russian Federation, Chief Researcher of the Irrigation Systems
Department, 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

Turapin Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Acting Director, All-
Russian Scientific Research Institute of Irrigation and Agricultural Supply Systems
Raduga (140483, Russia, Kolomna, Kolomna city district, Raduzhny settlement, 38),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-1198-2511>, prraduga@yandex.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 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

Аннотация. Статья посвящена решению актуальной проблемы эксплуатации широкозахватных дождевальных машин кругового действия – интенсивному колееобразованию и росту энергозатрат при движении последних тележек по переувлажненной почве. Целью исследования является разработка и верификация комплексной реологической модели, позволяющей прогнозировать формирование колеи и оптимизировать параметры ходовых систем для минимизации негативного воздействия на грунт.

В качестве основного метода использован реологический подход, рассматривающий почву как нелинейную упруго-вязко-пластичную среду. Разработанная трехпараметрическая модель учитывает многократные проходы движителей, реологические свойства грунта, геометрию пневматических колес и жестких уширителей. Модель описывает процесс колееобразования через систему уравнений, включающих определение приведенного диаметра колеса, длины пятна контакта и глубины колеи на каждом проходе, а также силы сопротивления качению.

Верификация модели проведена на примере дождевальных машин «Кубань-ЛК1» и «Фрегат». Расчетная глубина колеи для базовой пневмошины 18,4R24 после 5-го прохода составила 0,231 м, что практически полностью совпало с экспериментальными данными (0,230 м), подтвердив высокую достоверность модели.

Сравнительный анализ трех конфигураций ходовой системы показал, что наиболее эффективным решением является оснащение концевых тележек базовыми шинами 18,4R24 с жесткими уширителями. Данная конфигурация обеспечивает снижение глубины колеи на 37,4% (до 0,132 м) и силы сопротивления качению на 34,8% по сравнению с базовым вариантом. Установлено, что оптимальный эффект достигается при соотношении радиусов уширителя и пневмоколеса в диапазоне $\frac{r}{R} = 0,7 - 0,8$, что обеспечивает вступление уширителя в работу на 3...4 проходе и эффективную стабилизацию колеи.

Разработанная модель служит инструментом для обоснования параметров

ходовых систем, позволяя значительно повысить эксплуатационную надежность дождевальнoй техники, снизить энергозатраты и минимизировать деградацию почвы.

Abstract. The article is devoted to solving an urgent problem of the operation of wide-range circular sprinkler machines - intensive track formation and increased energy consumption when moving end trolleys through waterlogged soil. The aim of the study is to develop and verify a comprehensive rheological model that makes it possible to predict track formation and optimize the parameters of running systems to minimize the negative impact on the ground.

The rheological approach is used as the main method, considering the soil as a nonlinear elastic-viscous-plastic medium. The developed three-parameter model takes into account multiple passages of propellers, rheological properties of the soil, geometry of pneumatic wheels and rigid wideners. The model describes the process of track formation through a system of equations that include determining the reduced wheel diameter, the length of the contact spot and the depth of the track at each pass, as well as the rolling resistance force.

The model was verified using the example of the Kuban-LK1 and Fregat sprinklers. The calculated track depth for the base tire 18.4R24 after the 5th pass was 0.231 m, which almost completely coincided with the experimental data (0.230 m), confirming the high reliability of the model.

A comparative analysis of the three chassis configurations has shown that the most effective solution is to equip the end bogies with 18.4R24 base tires with rigid wideners. This configuration reduces track depth by 37.4% (up to 0.132 m) and rolling resistance by 34.8% compared to the basic version. It is established that the optimal effect is achieved with the ratio of the widener and pneumatic wheel radii in the range $\frac{r}{R} = 0,7 - 0,8$, which ensures the entry of the widener into operation on the 3rd ...4th pass and effective track stabilization.

The developed model serves as a tool for substantiating the parameters of running systems, making it possible to significantly increase the operational reliability of sprinkler equipment, reduce energy consumption and minimize soil degradation.

Ключевые слова: широкозахватная дождевальная машина; колесобразование; реологическая модель; движитель; пневматическая шина; жесткий уширитель; сила сопротивления качению; переувлажненная почва; вязко-упруго-пластичная среда; оптимизация ходовой системы; Кубань-ЛК1; Фрегат; многократные проходы; несущая способность почвы; энергетические затраты.

Keywords: wide-range sprinkler; track formation; rheological model; propulsion; pneumatic tire; rigid expander; rolling resistance; waterlogged soil; viscoelastic-plastic medium; optimization of the running system; Kuban-LK1; Frigate; multiple passes; bearing capacity of the soil; energy costs.

Введение. Широкозахватные дождевальные машины (ДМ) кругового действия, такие как «Кубань-ЛК1», «Фрегат» (рисунок 1 а, б) и другие аналоги, наиболее распространенные средства орошения в крупных агрохозяйствах [3. 7, 17, 18].



а



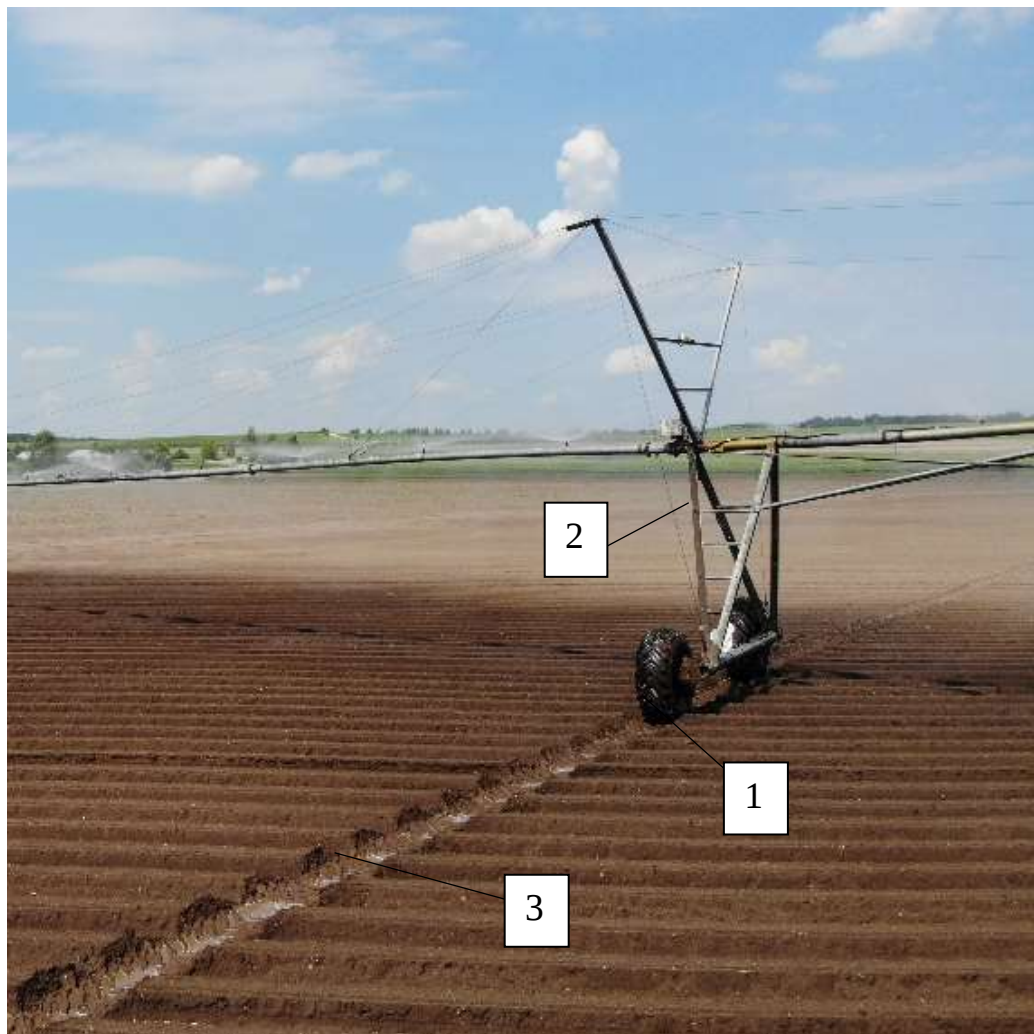
б

а – ДМ «Кубань-ЛК1»; б – Фрегат

Рисунок 1 – Широкозахватные дождевальные машины кругового действия

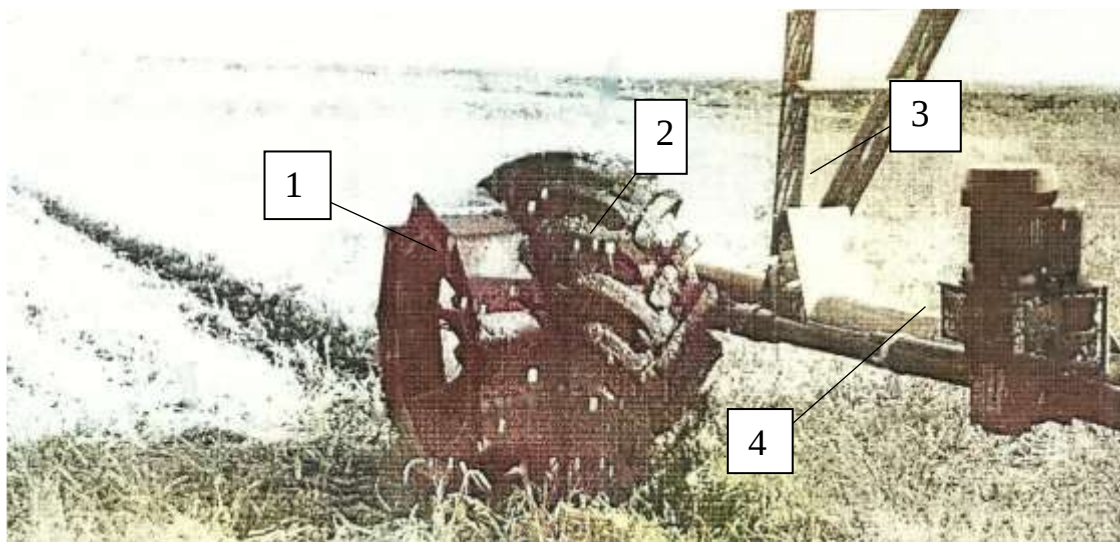
Одной из ключевых особенностей эксплуатации подобного типа машин, является малая надежность движения ходовых систем, особенно в концевой части машины, где наблюдается высокая интенсивность дождя и, как следствие, низкая несущая способность почвы. Исходя из этого, значительное колесобразование последних тележек машины, приводит к росту энергетических затрат и снижению опорно-сцепных свойств (рисунок 2) [6, 9, 11, 16].

Для исключения указанных недостатков предлагаются технические решения по оснащению последних тележек жесткими уширителями разной конструкции (рисунок 3), что позволяет увеличить опорную площадь контакта пневматического колеса [2, 15].



1 – пневмошина 18,4R24; 2 – рама тележки; 3 – колея от пневмошины.

Рисунок 2 – Колея от дождевальной машины «Кубань-ЛК1» на серийных шинах 18,4R24



1 – уширитель; 2 – пневмошина 18,4R24; 3 – рама тележки; 4 – привод.

Рисунок 3 – Общий вид последней тележки ДМ «Кубань-ЛК1» на пневмошинах 18,4R24 с уширителем

Однако, для обеспечения правильного подбора пневматических шин и жестких уширителей необходимо разработать и обосновать комплексную реологическую модель формирования колеи под движителями тележек ДМ, учитывающую энергетические и сцепные свойства машины, пластические свойства почвы, а также геометрические параметры пневмоколес и уширителей [10].

Цель и задачи исследования. Цель исследований – разработать комплексную реологически-энергетическую модель формирования колеи под ходовыми системами дождевальными машинами при многократных ее проходах для обоснования эффективности различных конфигураций ходовых систем, в частности оптимизации параметров жестких уширителей.

Существующие математические модели взаимодействия движителей с грунтом часто ограничиваются расчетом статической осадки или являются эмпирическими, не учитывающими реологическую природу деформации почвы при многократных проходах дождевальной машины. В то же время исследования в области механики грунтов показывают, что почва проявляет свойства вязко-упруго-пластичной среды, а ее деформация имеет ярко выраженный временной и циклический характер [4, 8, 20].

Материалы и методы. За основу для исследований принята

модифицированная методика А.В. Гуськова, описывающая установившийся процесс качения пневматического колеса по деформируемой поверхности. Однако, для учета многократных проходов тележек дождевальной машины, а также реологических свойств почвы, модель была усовершенствована, с учетом известных моделей, представленный в работах М. Н. Летошнев, С. Ф. Сайкина, А. Т. Беккер. Анализ математических моделей показал, что степенные зависимости обладают простотой, но не отражают физической сущности процесса деформации переувлажненной почвы, характерного для зон работы концевых тележек широкозахватных дождевальных машин. Трансцендентная зависимость, предложенная Я. С. Агейкиным, базируется на основных параметрах механики грунтов – несущей способности почвы p и модуле деформации E , а также позволяет учесть влияние верхнего твердого слоя почвы, что важно для прогнозирования предельной глубины колеи [1, 5, 19].

Для описания процесса колеобразования при многократных проходах дождевальной техники используется реологический подход. Почва рассматривается как нелинейная упруго-вязко-пластичная среда, чье состояние описывается равенством (1):

$$\sigma + \frac{\tau(t)d\sigma}{dt} = \sigma_T + E(\epsilon) + \frac{\mu(\epsilon)d\epsilon}{dt}, \quad (1)$$

где: σ – напряжение, Па;

E – модуль упругости, Па;

μ – вязкость, Па*с;

σ_T – предел текучести, Па;

ϵ – деформация;

t – время, сек.

Предлагаемая усовершенствованная модель является трехпараметрической и учитывает следующие параметры:

Приведенный диаметр пневматического колеса определяется по следующему выражению (2):

$$D_{\text{пр}} = D_0 + h_{\text{ш}} \left(\frac{D_0 - 2h - h_{\text{ш}}}{D_0} \right) \quad (2)$$

где D_0 – наружный диаметр шины, м;

$h_{ш}$ – статический прогиб шины, м;

h – текущая глубина колеи, м.

Длина горизонтальной проекции пятна контакта после n -го прохода дождевальной машины определяется по зависимости (3):

$$a_n = \sqrt{2 \cdot R_{пр} \cdot (h_n - h_{n-1})} \quad (3)$$

где $R_{пр}$ – приведенный радиус колеса ($R_{пр} = D_{пр}/2$), м;

h_n, h_{n-1} – осадки (глубины колеи) после n -го и $(n - 1)$ -го проходов, м.

Глубина колеи на n -ом проходе определяется из решения модифицированного уравнения, учитывающего статическую нагрузку и реологические свойства почвенной поверхности:

$$\frac{P}{b_{эфф}} = p_s \cdot Q + \left[\frac{\mu_0 \cdot a_n^2}{2} + \frac{\mu \cdot h_n \cdot a_n^2}{2} - \frac{\mu \cdot a_n^4}{8R_{пр}} \right] \cdot \frac{v}{R_{пр}} \quad (4)$$

где: P – нагрузка на колесо, Н;

$b_{эфф}$ – эффективная ширина профиля колеса (с учетом уширителя), м;

p_s – несущая способность почвы, Па;

Q – параметр, учитывающий толщину мягкого слоя грунта;

μ_0, μ – реологические параметры грунта (начальная вязкость и коэффициент ее изменения), Па·с;

v – скорость движения машины, м/с.

Сила сопротивления качению тележек дождевальной машины рассчитывается как суммарная работа при движении по деформированному грунту и определяется по выражению (5):

$$F_{сопр} = b_{эфф} \cdot \int_0^{h_n} p(h) dh \approx b_{эфф} \cdot \sigma_0 \cdot h_n + K \cdot (b_{эфф} \cdot \mu_0 \cdot v \cdot h_n) \quad (5)$$

где K – эмпирический коэффициент, учитывающий многократность нагружения.

Для более четкого понимания влияния ходовых систем на изменение почвенных свойств, указанная реологическая математическая модель обобщена в виде схемы (рисунок 4).

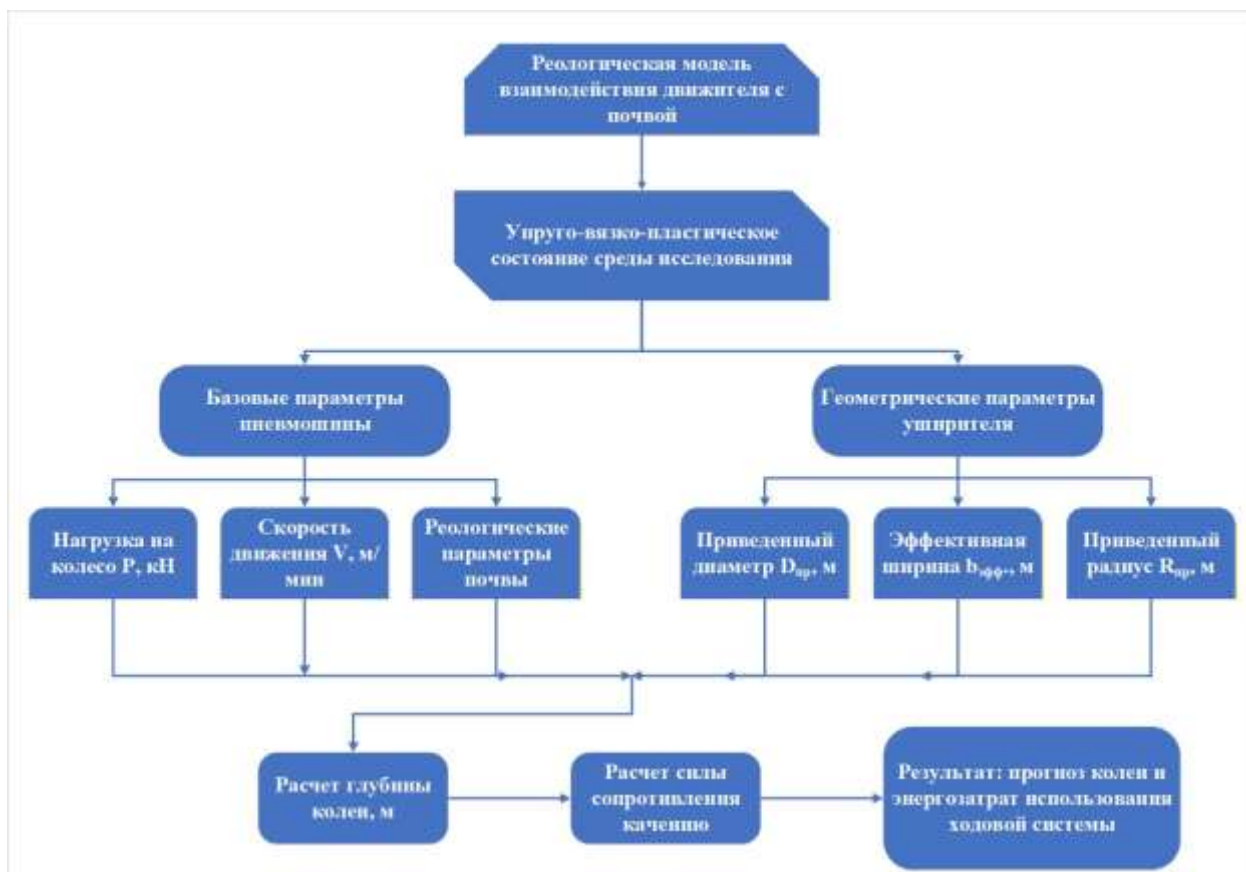


Рисунок 4 – Реологическая модель изменения пластических свойств почвы при многократных проходах дождевальной машины

Для определения достоверности работы предлагаемой модели использованы данные экспериментов дождевальных машин «Кубань-ЛК1» и «Фрегат». Реологические параметры грунта μ_0 и μ приняты на основе аппроксимации данных для связных переувлажненных почв. Для расчетов использовались три конфигурации ходовой системы ДМ: промежуточные тележки дождевальной машины, оборудованные базовыми пневматическими шинами 18,4R24; последняя тележка, оборудованная базовыми пневматическими шинами 18,4R24 и последняя тележка с базовым вариантом шин 18,4R24 и дополнительно оснащенная уширителем. Однако, при использовании конфигурации базовых пневмошин с уширителями, их параметры подбирались с учетом ограничения колеи. Поисковыми исследованиями установлено, что для обеспечения требуемого увеличения опорной площади и ограничения глубины колеи на уровне базового варианта в нормальных условиях, отношение радиуса жесткого уширителя (r) к радиусу

пневматической шины (R) должно находиться в диапазоне 0,7 – 0,8. Для шины 18,4R24 ($R_n \approx 0,622$ м) был принят приведенный радиус 0,472 м, что соответствует отношению $\frac{r}{R} \approx 0,76$. Исходные данные для расчета параметров движителей с учетом реологических свойств почвы по полагаемой математической модели представлены в таблице 1 [12, 13, 14].

Таблица 1

Исходные данные для прогнозирования

Параметр	Варианты исполнения ходовой системы		
	18,4R24 (промежуточные тележки)	18,4R24 (последняя тележка)	18,4R24 с уширителем (последняя тележка)
Нагрузка на пневматическое колесо G , кН	2,80	2,80	2,80
Наружный диаметр пневматического колеса D_n , м	1,395	1,395	1,395
Ширина профиля пневматического колеса b , м	0,467	0,467	0,467
Эффективная ширина пневмошины $b_{эфф}$, м	0,467	0,467	0,467
Давление в пневмошине P_w , кПа	190	190	190
Несущая способность почвы после полива σ_0 , кПа	100	70	70

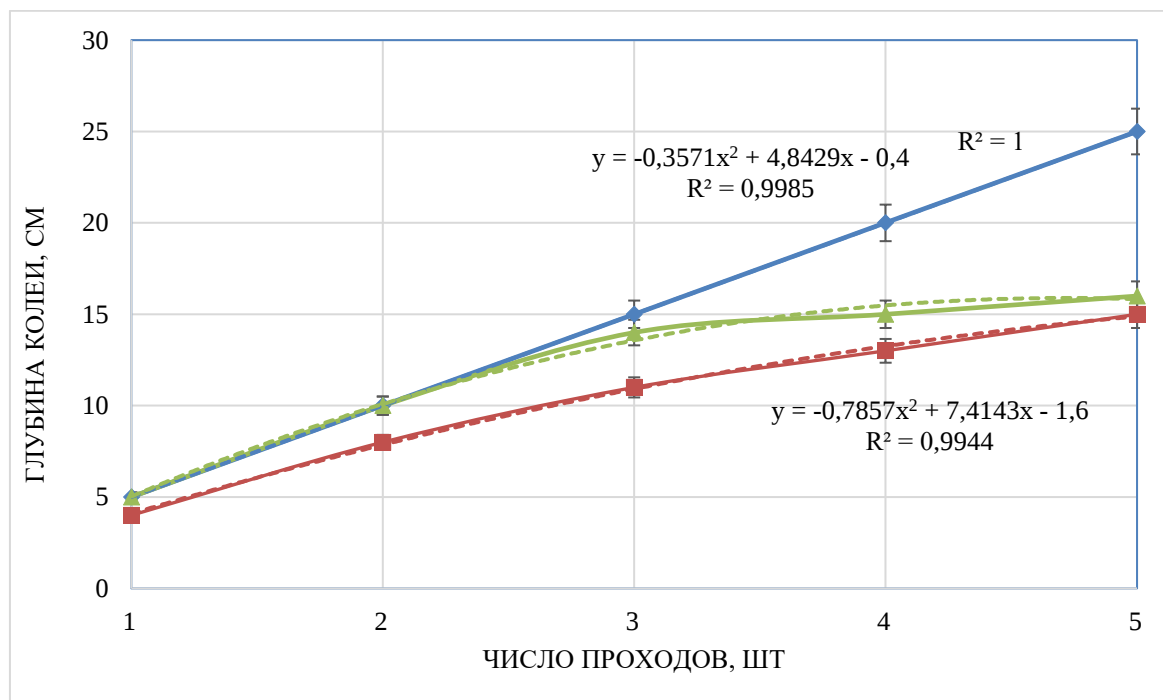
Результаты и обсуждение. На основе использования представленной реологической модели были получены следующие результаты: расчетная глубина колеи для базовой пневмошины 18,4R24 на последней тележке в концевой части ДМ после 5-ого прохода составила 0,231 м, что соответствует экспериментальным данным (0,230 м). Совпадение конечного значения, а также динамики роста по проходам (рисунок 5) подтверждает достоверность реологической модели.

Кривая 1 на рисунке 5 для конфигурации базовой ходовой системы на

последней тележке характеризуется интенсивным нелинейным ростом. К 5-му проходу модель предсказывает выход на квазистационарный режим, где прирост глубины замедляется, что объясняется уплотнением почвы на дне колеи и ростом коэффициента сопротивления качению.

Кривая 2 на рисунке 5 для конфигурации базовой ходовой системы с уширителем на последней тележке. При такой компоновке наблюдается наиболее благоприятная динамика. Комбинация максимально эффективной ширины профиля колеса ($b_{эфф}$) 467 мм и уменьшенного радиуса уширителя обеспечила максимальное распределение нагрузки и минимальную глубину колеи 0,132 м к 5-му проходу. Такая конфигурация практически нивелировала негативный эффект переувлажнения, превзойдя уровень базовой шины в нормальных условиях (0,152 м).

Кривая 3 на рисунке 5 для конфигурации с пневмошинами 18,4R24 на предпоследней тележке. При данной конфигурации наблюдается менее интенсивный рост колеи. Максимально эффективная ширина профиля ($b_{эфф}$) в 467 мм привела к снижению среднего давления на почву и, как следствие, уменьшила пластическую деформацию поверхности передвижения.



1 – промежуточные тележки; 2 – последние тележки без уширителей; 3 – концевые тележки с уширителями.

Рисунок 5 – Зависимость глубины колеи тележек ДМ от числа проходов

Зависимость силы сопротивления качению от глубины колеи показывает, что для базовой конфигурации (пневмошина 18,3R24) в районе последней тележки сопротивление качению ($F_{\text{сопр}}$) к 5-му проходу возрастает в 1,8 раза до 3,94 кН по сравнению с ее значением на 1-м проходе 2,19 кН. Использование уширителя пневмоколес ограничивает рост энергетических затрат в 1,3 раза до 2,57 кН по сравнению с начальным значением 1,98 кН.

Таблица 2

Сравнительные расчетные показатели на 5-ом проходе последней тележки ДМ с различными конфигурациями ходовой системы

Вариант исполнения	Глубина колеи, м	Снижение колеи, %	$F_{\text{сопр}}$, кН	Снижение $F_{\text{сопр}}$, %
18,4R24 (промежуточные тележки)	0,211	—	3,94	—
18,4R24 (последняя тележка)	0,160	24,1	2,78	29,4
18,4R24 с уширителем (последняя тележка)	0,132	37,4	2,57	34,8

Исходя из стоимости и весовых показателей, по данным теоретико-экспериментальных исследований, рекомендуется концевую часть, оснащать пневмошинами с профилем 18,3R24 с дополнительно установленным, жестким уширителем. Значение радиуса уширителя определяется уменьшением радиуса пневматического колеса на величину, средней глубины погружения (0,15 м) пневмошин с обычным профилем, установленных на промежуточных тележках, по завершению поливного сезона (после пятого прохода машины). При этом, отношение радиусов уширителя к пневмоколесу, для пневмошин, применяемых на дождевальной технике, диаметром 0,10 – 0,15 м, составляет 0,7...0,8 (таблица 3).

Таблица 3

Обоснование отношения радиусов уширителя для различных диаметров пневматических шин обычного профиля, исходя из допустимой средней глубины их погружения в конце поливного сезона

№ п.п.	Диаметр, м		Отношение $\frac{r}{R}$
	пневмошины, D	жесткого уширителя, d	
1.	0,100	0,070	0,700
2.	0,110	0,080	0,720
3.	0,120	0,090	0,750
4.	0,130	0,100	0,760
5.	0,140	0,110	0,780
6.	0,150	0,120	0,800

Полученные результаты подтверждены экспериментальными данными и патентами Российской Федерации. Расчетные данные показывают, что предложенное соотношение $\frac{r}{R} = 0,7 - 0,8$ позволяет добиться оптимального распределения давления. При таком соотношении жесткий уширитель вступает в работу на 3...4 проходе, именно тогда, когда пластические деформации грунта начинают преобладать над упругими, и эффективно стабилизирует глубину колеи. Это подтверждает, что данное техническое решение является инженерно обоснованным, параметры которого могут быть рассчитаны с использованием разработанной комплексной модели. Таким образом, модель служит инструментом для оптимизации параметров ходовых систем широкозахватной дождевальной техники.

Выводы. Проведенное исследование подтвердило высокую эффективность разработанной реологической модели для прогнозирования колееобразования и оптимизации ходовых систем широкозахватных дождевальных машин. Достоверность модели, показавшей расхождение с экспериментом всего в 0,001 м (0,231 м против 0,230 м), позволяет с высокой точностью оценивать влияние различных технических решений на деформацию переувлажненной почвы.

Обосновано, что оснащение концевых тележек жесткими уширителями является наиболее рациональным решением, обеспечивающим снижение

глубины колеи на 37,4% (до 0,132 м) и силы сопротивления качению на 34,8% по сравнению с базовой конфигурацией. Установлено, что оптимальный эффект достигается при соотношении радиусов уширителя и пневмоколеса в диапазоне $\frac{r}{R} = 0,7 - 0,8$, что гарантирует включение уширителя в работу на 3...4 проходе и эффективную стабилизацию колеи. Таким образом, использование комплекса из базовой шины 18,4R24 и уширителя представляет собой инженерно и экономически целесообразный способ повышения эксплуатационной надежности дождевальной техники, обеспечивающий значительное снижение энергозатрат и сохранение почвенной структуры.

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. 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. 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.

9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. Патент № 2782270 С2 Российская Федерация, МПК А01G 25/09, В60В 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.

13. Патент на полезную модель № 183135 U1 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. Рембалович, 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.

14. Патент на полезную модель № 217249 U1 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

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. 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.

9. A. I. Smirnov, A. I. Ryazantsev, E. Yu. Evseev [Some ways to reduce rolling resistance of multi-support electrified sprinkler machines]. // Development of the 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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 of Irrigation and Agricultural Water Supply Systems "Raduga". – EDN OGLVIQ.

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

© Рязанцев А.И., Турапин С.С., Антипов А.О., Евсеев Е.Ю. 2025. *International agricultural journal*, 2025, №6, 50-70

Для цитирования: Рязанцев А.И., Турапин С.С., Антипов А.О., Евсеев Е.Ю. Обоснование модернизации ходовой системы широкозахватных дождевальных машин // *International agricultural journal*. 2025. № 6, 50-70