

Научная статья

Original article

УДК 631.347.3.012.3.001.2

doi: [https://doi.org/10.55186/25880209\\_2026\\_10\\_3\\_29](https://doi.org/10.55186/25880209_2026_10_3_29)

edn: ERGTCE

**ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ  
ШИРОКОЗАХВАТНОЙ ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ  
ENERGY SAVING OF THE RUNNING SYSTEM OF A WIDE-RANGE  
SPRINKLER MACHINE**



**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](mailto:ryazantsev.41@mail.ru)

**Евсеев Евгений Юрьевич**, 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/0000-0002-6133-2661>, [evseev.evgeniy.1995@mail.ru](mailto:evseev.evgeniy.1995@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](mailto:antipov.aleksei2010@yandex.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](mailto:centorion@yandex.ru)

**Anatoly I. Ryazantsev**, Doctor of technical sciences, professor, honored scientist of the Russian Federation, chief researcher at the department of sprinkler irrigation systems, Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Research Institute of Irrigation and Agricultural Water Supply "Raduga" (38, Raduzhny settlement, Kolomna urban district, Kolomna, 140483 Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9829-8196>, [ryazantsev.41@mail.ru](mailto:ryazantsev.41@mail.ru)

**Evgeny Yu. Evseev**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Technical Systems, Theory and Methodology of Educational Processes at the State Social and Humanitarian University (30, Zelenaya Street, Kolomna, 140411 Russia), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6133-2661>, [evseev.evgeniy.1995@mail.ru](mailto:evseev.evgeniy.1995@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](mailto:antipov.aleksei2010@yandex.ru)

**Igor Valerievich. 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](mailto:centorion@yandex.ru)

**Аннотация.** Совершенствование широкозахватных дождевальных машин (ДМ) типа «Кубань-ЛК1» направлено на расширение их функциональных возможностей и снижение энергозатрат при работе на рельефах с уклонами

до 0,07. Наиболее перспективным решением является оснащение ходовых систем независимыми мотор-редукторами с энергоэффективным зубчатым зацеплением, позволяющим повысить КПД привода в два раза по сравнению с серийной блокированной трансмиссией червячного типа.

В ходе полевых исследований, проведенных в АО «Озеры» Московской области, оценивались энергозатраты на передвижение девяти- и шеститележной ДМ «Кубань-ЛК1», оборудованной серийной схемой компоновки ходовой системы. Измерение крутящих моментов на выходных валах осуществлялось с помощью тензометрических торсиометров при различных режимах движения (подъем, спуск, преодоление канав и колеи глубиной 30 см), как с водой в магистрали, так и без нее.

Установлено, что максимальные крутящие моменты возникают при преодолении препятствий и достигают 1700...2000 кг/см, что не превышает допустимых напряжений для выходных валов. Суммарный момент на опорной тележке не превосходит 2900 кг/см. Статистическая обработка данных (на примере тележки №9) показала, что распределение крутящих моментов подчиняется нормальному закону с коэффициентом вариации 0,2...0,4. Средние значения нагрузок находятся в диапазоне 420...690 кг/см, а превышение уровня 1500 кг/см наблюдается не более чем в 5% времени работы. Выявлено, что при движении на спуск возникающая вибрация трубопровода и рывки не приводят к значительному росту крутящего момента (изменение 100...150 кг/см), что свидетельствует о снижении паразитных нагрузок, характерных для серийной блокированной трансмиссии.

Применение же независимых мотор-редукторов с энергоэффективным зубчатым зацеплением в ходовой системе дождевальной машины «Кубань-ЛК1» обеспечит прочность и работоспособность конструкции при эксплуатации на уклонах до 0,07 и при преодолении неровностей. Сравнение полученных результатов с теоретическими подтверждают возможность снижения энергетических затрат на передвижение и расширения

технологических возможностей машины (полив малыми нормами, мелкодисперсное увлажнение). Дальнейшие исследования целесообразно направить на оценку долговечности энергоэффективных передач в условиях переменного нагружения и оптимизацию алгоритмов управления электроприводами.

**Abstract.** The improvement of wide-range sprinkler machines (DM) of the Kuban-LK1 type is aimed at expanding their functionality and reducing energy consumption when working on terrain with slopes up to 0.07. The most promising solution is to equip the driving systems with independent gear motors with energy-efficient gearing, which makes it possible to double the drive efficiency compared to a standard worm-type interlocked transmission.

In the course of field research conducted at JSC Ozery in the Moscow region, the energy consumption for the movement of nine- and six-bed DM Kuban-LK1, equipped with a serial layout scheme for the chassis system, was estimated. The measurement of torques on the output shafts was carried out using strain gauge torsimeters in various driving modes (ascent, descent, overcoming ditches and tracks with a depth of 30 cm), both with and without water in the main.

It is established that the maximum torques occur when overcoming obstacles and reach 1700...2000 kg/cm, which does not exceed the permissible stresses for the output shafts. The total torque on the support trolley does not exceed 2,900 kg/cm. Statistical data processing (using the example of trolley No. 9) showed that the distribution of torques obeys a normal law with a coefficient of variation of 0.2...0.4. The average load values are in the range of 420...690 kg/cm, and exceeding the level of 1500 kg/cm is observed in no more than 5% of the operating time. It was found that when driving downhill, the resulting vibration of the pipeline and jerks do not lead to a significant increase in torque (a change of 100...150 kg/cm), which indicates a decrease in parasitic loads characteristic of a serial blocked transmission.

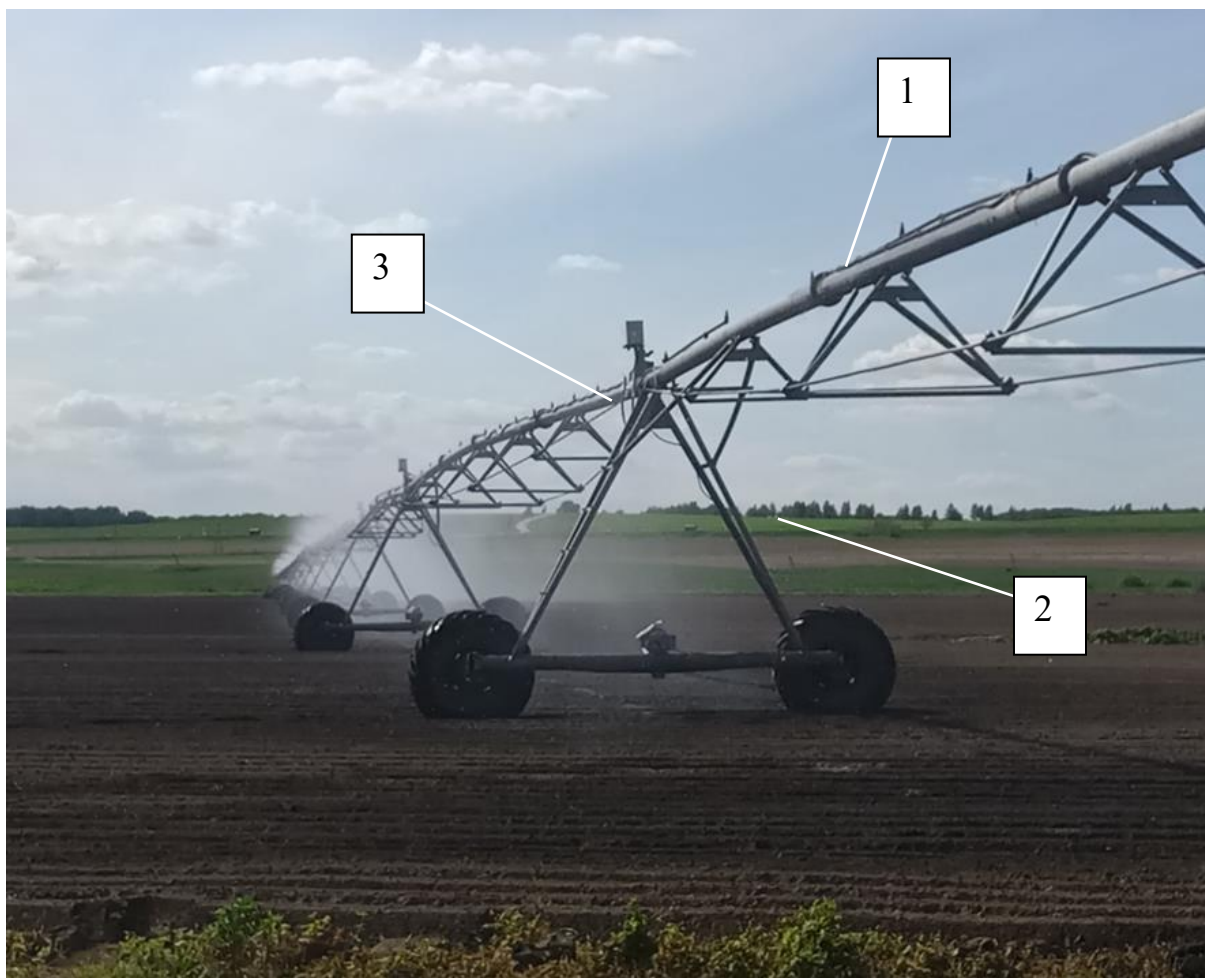
The use of independent gear motors with energy-efficient gear engagement in the running system of the Kuban-LK1 sprinkler machine will ensure the strength

and operability of the structure when operating on slopes up to 0.07 and when overcoming irregularities. A comparison of the obtained results with theoretical ones confirms the possibility of reducing energy costs for movement and expanding the technological capabilities of the machine (low-volume irrigation, fine-dispersed humidification). It is advisable to focus further research on evaluating the durability of energy-efficient transmissions under variable load conditions and optimizing control algorithms for electric drives.

**Ключевые слова:** дождевальная машина «Кубань-ЛК1», энергоемкий редуктор, независимый электропривод, крутящий момент, тензометрирование, энергоэффективность

**Keywords:** sprinkler machine "Kuban-LK1", energy-intensive gearbox, independent electric drive, torque, strain gauge, energy efficiency

**Введение.** С целью совершенствования и расширения возможностей применения широкозахватной дождевальной машины «Кубань-ЛК1» (рисунок 1) на различных, по уклону, площадях (до 0,07), требуется проведение дальнейших исследований, направленных на совершенствование приводов опорных тележек. Как показали исследования, наиболее перспективным вариантом снижения энергетических затрат на передвижение ходовых систем дождевальной машины, является ее оснащение независимыми редукторами с высокопроизводительным зубчатым зацеплением. Компоновка ходовых систем тележек ДМ указанным способом позволит повысить коэффициент полезного действия в 2 раза, а новые типы зубчатых зацеплений обладают большей вариативностью передаточных отношений. Указанные технические решения расширяют диапазон применения широкозахватной дождевальной машины «Кубань-ЛК1», например позволяют осуществлять полив с малыми поливными нормами, осуществляют мелкодисперсное увлажнение и другие, при этом уменьшая энергетические затраты на передвижение, присущие серийной модификации ДМ [2, 13, 14].



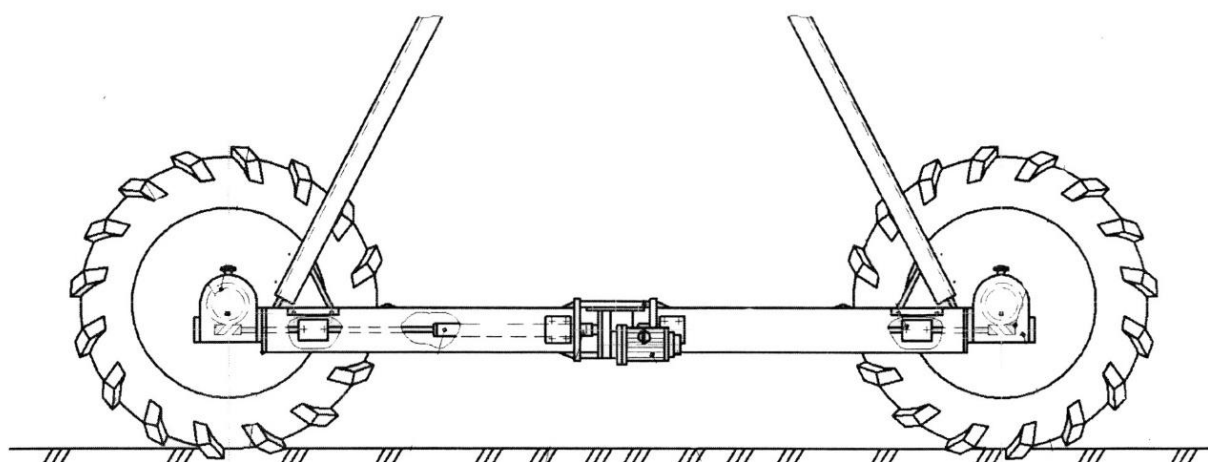
1 – дождевальные насадки; 2 – ходовая тележка; 3 – центральный водопровод

Рисунок 1 – Общий вид дождевальной машины «Кубань-ЛК»

**Материалы и методы.** На настоящее время, на ДМ «Кубань-ЛК1» используется следующая компоновка привода. Крутящий момент, от электродвигателя с центральным мотор-редуктор, через выходные валы, передается на индивидуальные колесные редуктора червячного типа, посредством карданной передачи. Такой тип трансмиссии имеет ряд недостатков, наиболее выраженными являются наличие заблокированной обратной передачи и паразитных мощностей, что приводит увеличенным энергетическим затрат на передвижение (рисунок 2) [3, 9, 19].



а



б

1 – мотор-редуктор; 2 – высокослойные шины 18,4-24

Рисунок 2 – Общий вид (а) и схема (б) серийной самоходной тележки ДМ «Кубань-ЛК1»

Дополнительно, за счет применения приводов с эффектом блокировки, в определенных условиях эксплуатации, возникает циркуляция мощности.

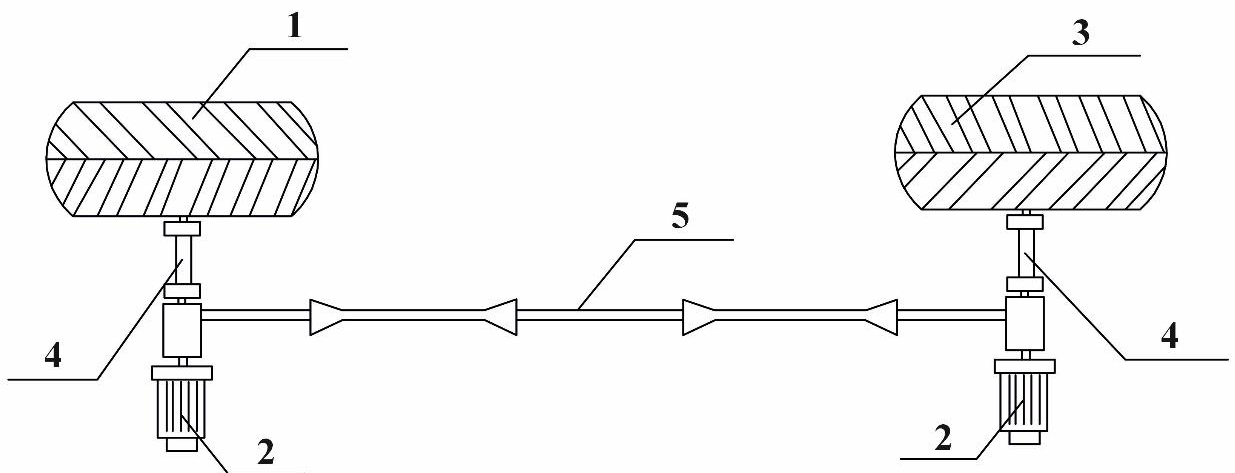
Это происходит за счет неравномерных окружных скоростей вращения выходных валов колесных редукторов, что снижает коэффициент полезного действия работы машины, а также увеличивает износ пневматических шин. Стоит отметить, что использование дифференциального привода дает возможность использования обратного хода, однако приносит другие отрицательные качества. Так, если одно колесо находится в худших сцепных условиях, то второе колесо, из-за дифференциального эффекта, также будет иметь пониженные сцепные характеристики, однако при использовании блокированных червячных редукторов, поступательные скорости выравниваются только при буксовании или скольжении одного из колес [6, 16, 20].

Как показали поисковые исследования, наилучшие тягово-сцепные показатели работы приводов тележек ДМ могут быть получены при оснащении каждого колеса машины независимым мотор-редуктором с высокоэффективным зубчатым зацеплением (рисунок 3) [5, 11, 15].



Рисунок 3 – Тележка ДМ «Кубань-ЛК1» с энергосберегающим независимым электроприводом

В настоящее время отечественная промышленность осваивает производство нового вида зубчатых передач, получивших название волновых. Отличительной особенностью последних является использование гибких зубчатых колес, за счет чего передачи приобретают новые свойства и возможности. Возможность получения большего кинематического эффекта, малых габаритов, рациональной компоновки, осуществление передачи движения сквозь непроницаемые стенки и ряд других свойств волновых передач позволяют обеспечить широкое их внедрение на приводах опорных тележек дождевальных машин с электроприводом. Анализ работы редукторов с волновым зацеплением показал, что они обладают рядом преимуществ: большое передаточное отношение – до 300 в одной ступени; до 40% зубьев находятся в одновременном зацеплении; высокая кинематическая точность; К.П.Д. волновых передач при одинаковых передаточных отношениях имеет высокие значения ( $\eta = 0.8...0.91$ ) [4, 7, 13]. Кинематическая схема независимого привода опорной тележки представлена на рисунке 4.



1 – левое пневматическое колесо; 2 – волновые мотор-редукторы; 3 – правое пневматическое колесо; 4 – торсиометры; 5 – рама

Рисунок 4 – Кинематическая схема опорной тележки дождевальной машины «Кубань-ЛК1»

**Результаты.** Исследования многоопорной ДМ «Кубань-ЛК1» проводились в АО «Озеры» Коломенского района Московской области. Производился полив картофеля. Агрофон – поле, засаженное картофелем. Цель полевых исследований – определение фактических энергозатрат на передвижение тележек дождевальной машины с серийной схемой компоновки ходовой системы.

Для измерения крутящего момента на вале электропривода был использован специальный измерительный прибор – торсиометр. Торсиометр функционально состоит из датчика крутящего момента и электронного усилительного блока. В датчике торсиометра использован тензометрический способ измерения крутящего момента с бесконтактной передачей сигнала от тензорезисторов с помощью вращающегося трансформатора. Измерительный валик датчика с помощью фланцевых соединений включается в состав силовой передачи крутящего момента исследуемой тележки. На измерительном валике наклеены 4 тензорезистора, которые электрически включены в мостовую измерительную схему. Диагонали датчиков подключены к подвижным обмоткам вращающегося трансформатора. Неподвижные обмотки трансформатора через разъем, закрепленный на корпусе датчика, подключены к электронному блоку торсиометра [1, 8, 17, 18].

Выходные валы червячных редукторов с установленными на них тензорезисторами предварительно тарировались в лабораторных условиях в диапазоне  $M_{кр} \pm 1400$  кгс/см.

В полевых условиях испытания выходных валов колесных редукторов производились в два этапа. На первом этапе исследований дождевальной машины «Кубань-ЛК1» с шестью опорными тележками, крутящий момент в выходных валах колесных редукторов регистрировался при следующих режимах движения:

- движение вверх по склону с показателем подъема 0,07;
- движение вниз по склону, с уклоном 0,07;

Испытания проводились с водой и без в главной магистрали. Во всех режимах испытания проводились в 5-кратной повторности. В результате проведения, были получены осциллограммы крутящих моментов колесных мотор-редукторов. Анализ полученных данных, показал, что значение крутящего момента на каждом вале редуктора начинается  $M_{кр} = 0$  по оси ординат при этом, знак крутящего момента изменяется на противоположный при изменении направления движения тележки. При технологических остановках, во время движения тележки (кроме последней) видно прекращение отметки оборотов с карданных валов. В таблице 1 приведены максимальные значения крутящих моментов при испытании шеститележечной дождевальной машины, а на рисунке 5 – график зависимости крутящих момент левого и правого выходных валов колесных редукторов по длине дождевальной машины при движении на склоне. При анализе полученных данных тарировка крутящего момента для записей составляла на 10 мм – 760 кг/см [10, 12].

Таблица 1

**Показатели крутящего момента на выходных валах колесных редукторов**

№ тележки	Рельеф участка	$M_{\text{макс.}}$	$M_{\text{макс.}}$ левый	$M_{\text{макс.}}$	$M_{\text{макс.}}$ левый
		правый		правый	
		Без воды		С водой	
2	Ровное поле	780	600	400	390
	Подъем	1150	670	540	430
	С канавами	1400	50		
	Спуск	940	430	560	520
5	Ровное поле	300	300	450	300
	С канавами	1700	780	930	780
	Подъем	1050	950	620	620
	Спуск	780	620	310	470
6	Ровное поле	800	780	320	520
	Подъем	1250	780	640	780
	Спуск	500	570	300	500

Согласно приведенным в таблице данным, максимальный крутящий момент зафиксирован при проходе тележки №5 через канаву, он составил 1700 кг/см.

Следует отметить, что при движении тележки с уклона иногда наблюдаются рывки тележки и одновременно с этим вибрация трубопровода. Крутящий момент при этом на выходных валах колесных мотор-редукторов не превышал  $M_{\text{макс.}} = 150 \text{ кг/см}$ .

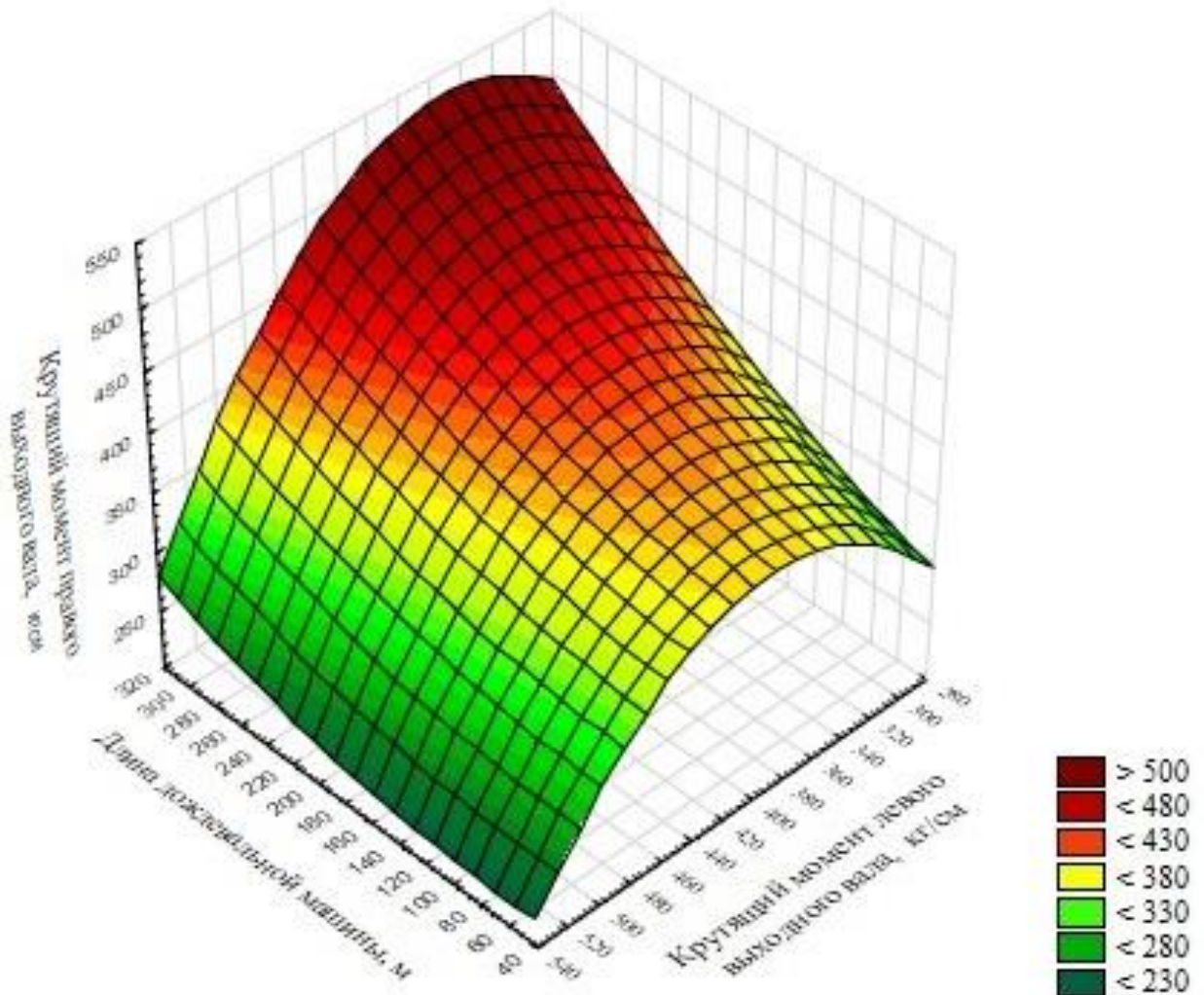


Рисунок 5 – График зависимости крутящих момент левого и правого выходных валов колесных редукторов по длине дождевальной машины при движении на склоне

Второй этап испытаний дождевальной машины «Кубань-ЛК1» проводился на ровном участке поля, тележки двигались по колее глубиной 30 см с незначительными подъемами и углублениями. В ходе исследований определялись крутящие моменты тележек №2, №8, №9 в режиме перегона с водой.

Тензометрирование производилось на работающей девятитележной дождевальной машине с учетом пусковых моментов и предварительно нагруженного состояния валов при пусках и остановках. В результате проведения испытаний получены осциллограммы, результаты обработки которых приведены в таблице 2. На рисунке 6 представлен график зависимости крутящих момент левого и правого выходных валов колесных редукторов по длине дождевальной машины при движении на ровном участке.

Таблица 2

**Максимальные моменты для каждого выходного вала испытуемых тележек и суммарных максимальных моментов**

№ тележки		$M_{\text{макс.}}$	$M_{\text{макс.}}$	$M_{\text{макс.}}$	$M_{\text{макс.}}$	$\sum M_{\text{макс.}}$ опорной тележки
		правый	левый	левый	правый	
2	вперед	1600	600	1400	800	$1400+1000=2400$
	назад	2000	900	1050	1050	$2000+900=2900$
8	вперед	850	50	650	150	$600+500=1100$
	назад	1000	300	650	400	$1000+300=1300$
8	повтор вперед	1100	300	800	400	$1100+300=1400$
	повтор назад	1000	200	800	400	$1000+200=1200$
9	вперед	950	720	900	800	$950+720=1670$
	назад	650	350	450	550	$600+400=1000$
9	повтор вперед	1000	800	950	800	$1000+800=1800$

В таблице приведены величины моментов, возникающих в правом и левом выходных валах колесных редукторов опорной тележки. Согласно данным таблицы, максимальный крутящий момент зафиксирован в правом вале тележки №2 и равен 2000 кг/см. В левом вале этой тележки  $M_{\text{макс.}}=1400$  кг/см. Суммарный момент на опорной тележке при этих испытаниях не превышал 2900 кг/см. Из таблицы видно, что  $M_{\text{макс.}}$  на валах тележки №8 и №9 не превышает 1000...1100 кг/см, а максимальный крутящий момент на выходном вале редуктора зафиксирован на тележке №8 – 1400 кг/см, на тележке №9 – 1800 кг/см.

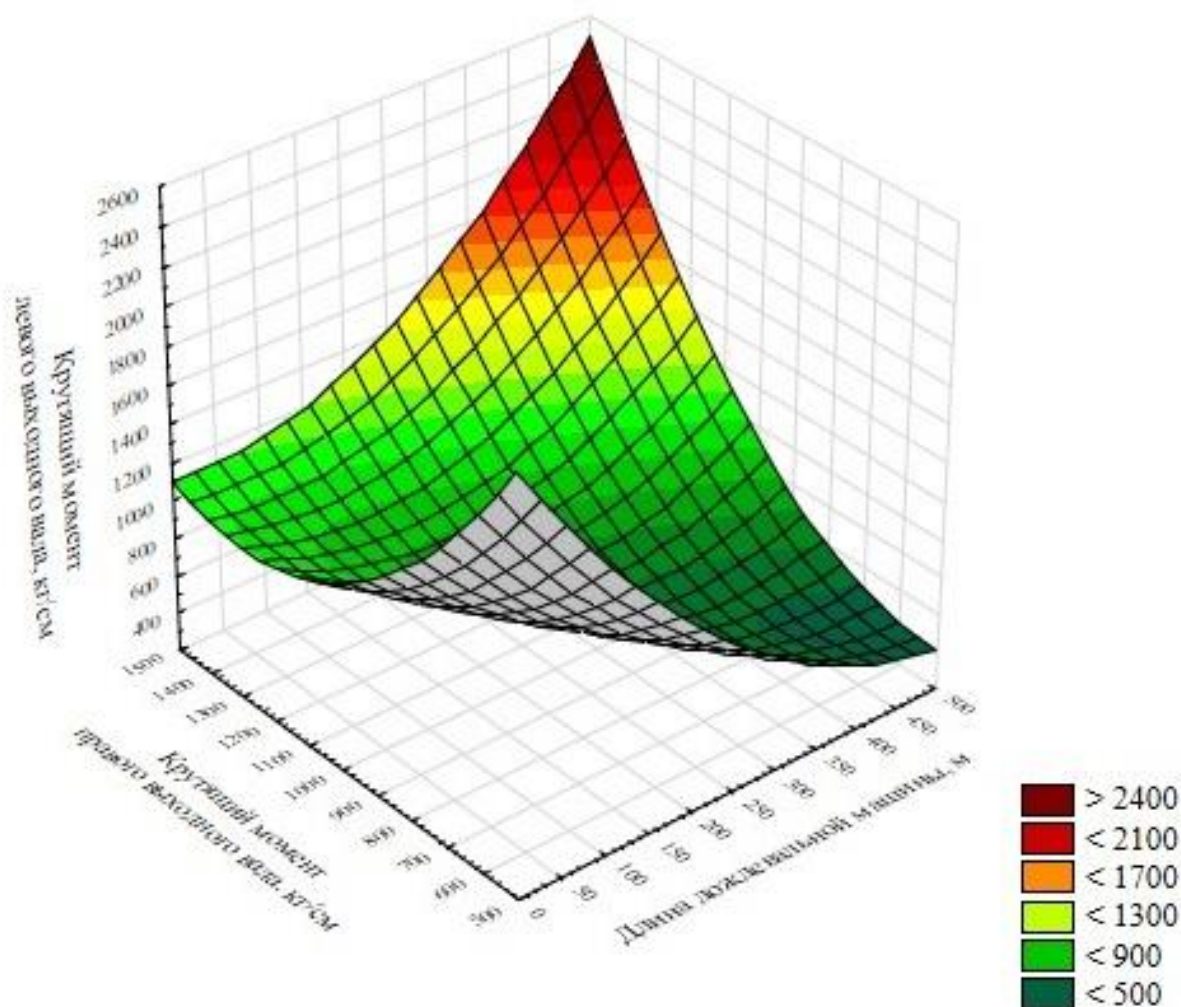


Рисунок 6 – График зависимости крутящих момент левого и правого выходных валов колесных редукторов по длине дождевальной машины при движении на ровном участке

Для установления законов формирования переменных нагрузок, действующих на выходные валы колесных редукторов дождевальной машины «Кубань-ЛК1» при ее движении с различными скоростями (в различных режимах) по неровностям поля, необходимо найти математическое описание связей между характеристиками переменных воздействий на колеса машины и характеристикой сил, возникающих при этом в выходных валах колесных редукторов. Основной характеристикой поверхности поля, является профиль колеи, по которой движется каждая тележка дождевальной машины. Процесс нагружения валов является случайным и при движении тележки по полю, запись функции «нагрузка-

время», на отрезке пути ограниченной протяженности может не повторяться. Однако каждая запись достаточной протяженности может быть оценена при помощи функции распределения.

Из анализа полученных по результатам статистической обработки данных следует, что выходной вал левого колеса испытывал несколько большие нагрузки по сравнению с валом правого колеса как на переднем, так и на заднем ходу. При этом на переднем ходу уровень нагрузок в среднем и по максимальным значениям оказался в 1,2...1,5 раза больше, чем на заднем. Величины крутящих моментов на каждом из валов не превышают 1000 кг/см, средние значения находятся в диапазоне 420...690 кг/см, а среднеквадратичные – 110...180 кг/см. При этом возможные значения крутящего момента группируются около средней величины  $M_{ср.}$  в достаточно определенном и ограниченном диапазоне  $M_{ср.} = \pm 200...300$  кг/см с примерно одинаковой вероятностью появления  $P_j = 10...20\%$  в принятом интервале 100 кг/см. Отклонения в сторону больших значений моментов от верхней границы указанного интервала занимают по времени 1...5%.

Приведенный анализ касался уровней нагрузок для каждого из выходных валов колесных редукторов в отдельности. Анализ суммарного крутящего момента на опорной тележке в данной работе не проводился. Однако учитывая слабую корреляцию синхронных значений моментов на валах и с учетом приведенных результатов по каждому валу, можно полагать, что момент в основном измеряется в пределах  $1000 \pm 500$  кг/см с равновероятными значениями в этом диапазоне, а превышение уровня 1500 кг/см имеет место в течении не более чем 5% общего времени работы, причем максимальные величины полного значения момента во всяком случае не превосходят 2000 кг/см.

**Обсуждение.** Проведенные в АО «Озеры» полевые испытания дождевальная машины «Кубань-ЛК1», оснащенной серийной схемой компоновки ходовой системы ДМ, позволили получить количественные

характеристики крутящих моментов, возникающих в выходных валах при различных режимах движения. Полученные экспериментальные данные подтверждают теоретические предпосылки о существенном повышении эффективности ходовой системы при отказе от заблокированной трансмиссии с червячными редукторами в пользу независимого привода каждого колеса.

Анализ теоретических данных показал, что внедрение волновых редукторов позволит обеспечить устойчивое движение машины как на ровных участках, так и на склонах с уклоном до 0,07, а также при преодолении неровностей (канав, колеи глубиной 30 см). Максимальные зафиксированные крутящие моменты на серийной схеме (1700...2000 кг/см) возникают в момент преодоления препятствий (тележка №5 при проходе через ров, тележка №2 при движении назад). Эти значения не превышают допустимых напряжений для выходных валов, что свидетельствует о запасе прочности, однако не гарантирует возможность к эксплуатации в сложных агротехнических условиях.

Особого внимания заслуживает тот факт, что при движении на спуск наблюдались кратковременные рывки и низкочастотная вибрация трубопровода, однако, эти явления не приводили к значительному росту крутящего момента (изменение составило лишь 100...150 кг/см). Это косвенно указывает на снижение паразитных нагрузок и циркуляции мощности, характерных для червячных редукторов с блокировкой.

Статистическая обработка данных (на примере тележки №9) показала, что распределение крутящих моментов подчиняется нормальному закону с коэффициентом вариации 0,2...0,4. Это свидетельствует о стабильности процесса нагружения и позволяет прогнозировать ресурс работы редукторов в широком диапазоне условий. Средние значения крутящего момента (420...690 кг/см) значительно ниже максимальных пиковых, что характерно для квазистатического режима нагружения. Лишь в единичных случаях (1...5% времени) наблюдаются знакопеременные напряжения, возникающие

при резонансных явлениях или проходе крупных неровностей, однако их амплитуда остается в допустимых пределах.

Сравнение полученных данных использования серийной схемы компоновки с теоретически ожидаемыми показателями использования схемы с независимым мотор-редукторами (повышение КПД в 2 раза, снижение энергозатрат) позволяет сделать вывод о практической реализуемости заявленных преимуществ. Тем не менее, в ходе испытаний выявлены зоны, требующие дополнительного изучения. В частности, не полностью раскрыт характер влияния вибраций магистрального трубопровода на долговременную стойкость передач при длительной эксплуатации. Также требует уточнения корреляция между суммарным моментом на опорной тележке и динамикой движения машины при одновременном преодолении несколькими тележками разнородных неровностей.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку методики расчета долговечности редукторов при переменных нагрузках, характерных для поливного периода, а также на оптимизацию алгоритмов управления независимыми электроприводами для минимизации динамических нагрузок в переходных режимах (пуск, реверс, движение по неровностям). Полученные результаты подтверждают целесообразность замены традиционных червячных колесных редукторов на независимые мотор-редуктора с энергоэффективной зубчатой передачей в составе ходовых систем широкозахватных дождевальных машин, что позволяет расширить функциональные возможности агрегата (мелкодисперсное орошение, полив малыми нормами) и снизить энергетические затраты на передвижение.

**Выводы.** Экспериментальное исследование крутящего момента выходных валах червячных редукторов дождевальной машины «Кубань-ЛК1», проведенное на склонах до 0,07 и при проходе через ров, показало допустимость возникающих при этом нагрузок с точки зрения прочности.

Анализ полученных данных о крутящем моменте на валах при испытаниях показал, что максимальный крутящий момент зафиксирован при

проходе тележки №5 через ров и равен 1700 кг/см. В этом же случае зафиксирован наибольший суммарный момент на опорной тележке  $\Sigma_{Макс.}(M_{пр.} + M_{лев.}) = 2500$  кг/см.

Следует отметить, что при движении машины вниз по склону наблюдались кратковременные рывки опорных тележек и низкочастотная вибрация магистрального трубопровода машины. Этому явлению сопутствовало незначительное изменение крутящего момента в выходных валах (от 100 до 150 кг/см).

Результаты испытаний дождевальнoй машины показали, что изменение напряжений от крутящего момента в валах в основном имеют квазистатический характер, и лишь в отдельных случаях одновременно с этими напряжениями возникают знакопеременные напряжения от кручения с частотой вращения выходного вала, возникающий при этом крутящий момент изменяется в пределах  $\pm 200$  кг/см, что соответствует напряжениям  $\tau = 90$  кг/см<sup>2</sup>. Максимальное значение крутящего момента на одном вале не превышало 2000 кг/см. Указанный максимальный момент вызывает в выходном вале напряжение от кручения  $\tau_{кр.}^{Макс.} = 90$  кг/см<sup>2</sup>.

Эти напряжения не превышают допусковых  $\tau_{кр.}^{доп.} = 1450$  кг/см<sup>2</sup>.

Установлено, что при проведенных испытаниях момент на выходном вале редуктора на всех режимах не превосходил 2900 кг/см.

Проведена выборочная статистическая обработка данных результатов испытаний двух выходных валов червячных редукторов тележки №9, где средний крутящий момент на выходном вале редуктора составил 500...1000 кг/см. Установлен нормальный закон распределения величин крутящих моментов на выходном вале редуктора с коэффициентом вариации 0,2...0,4. Полученные результаты подтверждают целесообразность замены традиционных червячных колесных редукторов на независимые мотор-редуктора с энергоэффективной зубчатой передачей в составе ходовых систем

широкозахватных дождевальных машин, что позволяет расширить функциональные возможности агрегата.

### Литература

1. ГОСТ 8224-1-2004. Машины дождевальные подвижные. Часть 1. Эксплуатационные характеристики и методы лабораторных и полевых испытаний. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044530>.
2. Евсеев Е.Ю., Рязанцев А.И., Рембалович Г.К., Антипов А.О., Мурог И.А. Технические решения по повышению производительности многофункциональной машины кругового действия на склоновых участках // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета имени П.А. Костычева. 2023. Т 15, № 2, С. 119-124 <https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.72.87.016> URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54188403>.
3. Евсеев, Е. Ю. Повышение производительности многофункциональной машины кругового действия на склонах / Е. Ю. Евсеев, А. И. Рязанцев // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. – 2023. – Т. 15, № 4. – С. 121-127. – DOI 10.36508/RSATU.2023.92.77.016. – EDN VPSSQO.
4. Евсеев, Е. Ю. Повышение эффективности применения многофункциональной машины на склоновых площадях / Е. Ю. Евсеев // Нива Поволжья. – 2023. – № 2(66). – DOI 10.36461/NP.2023.66.2.005. – EDN JDPPNM.
5. Журавлева, Л. А. Исследования параметров потока воды в трубопроводе широкозахватных дождевальных машин / Л. А. Журавлева, Б. Хеирбеик // Аграрный научный журнал. – 2023. – № 1. – С. 136-143. – DOI 10.28983/asj.y2023i1pp136-143. – EDN UIPXRK.
6. Журавлева, Л. А. Моделирование движения воды во вращающихся дождевателях широкозахватных дождевальных машин / Л. А. Журавлева, И. А. Попков, М. С. Магомедов // Природообустройство. – 2022. – № 3. – С. 48-53. – DOI 10.26897/1997-6011-2022-3-48-53. – EDN JPZYCQ.

7. Иванов М.Н. Волновые зубчатые передачи. М.: Высшая школа, 1981. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001063959?ysclid=losuwzf4b7441652634>.
8. Машина дождевальная электрифицированная круговая «Кубань-ЛК1» / Технические условия ТУ 4734-350-00008064-2005 // ФГНУ ВНИИ «Радуга» - Коломна, 2005.
9. Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин. Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Терехова Н.Н., Бакиров С.М. // Аграрный научный журнал.-2020.-N 7.-С. 81-84.-Рез. англ.-Библиогр.: с.84. Шифр ПЗ695 // Инженерно-техническое обеспечение АПК. Реферативный журнал. – 2021. – № 3. – С. 596. – EDN FCXFFY.
10. 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.
11. 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.
12. Патент на полезную модель № 204128 U1 Российская Федерация, МПК А01G 25/09, В05В 1/30. Многоопорная дождевальная машина кругового действия : № 2020143686 : заявл. 28.12.2020 : опубл. 11.05.2021 / 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". – EDN NOARXY.
13. Патент на полезную модель № 230829 U1 Российская Федерация, МПК А01G 25/09. Многоопорная дождевальная машина кругового действия : № 2024127534 : заявл. 18.09.2024 : опубл. 20.12.2024 / А. И. Рязанцев, С. С. Турапин, Е. Ю. Евсеев, С. О. Бережной ; заявитель Федеральное

государственное бюджетное научное учреждение "Всероссийский научно-исследовательский институт систем орошения и сельхозводоснабжения "Радуга". – EDN FXEMLK.

14. Ресурсосберегающие энергоэффективные экологически безопасные технологии и технические средства орошения: справ. – М.: ФГБНУ «Росинформагротех», 2015. – 264 с. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_008275977/?ysclid=losvbmr3tj149381548](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008275977/?ysclid=losvbmr3tj149381548).

15. Рязанцев, А. И. Особенности выбора редукторов, для использования в приводах опорных тележек широкозахватной дождевальная машины "Кубань - ЛК1" / А. И. Рязанцев, А. О. Антипов, Е. Ю. Евсеев // Высокопродуктивное и экологически чистое агрохозяйство на мелиорированных землях : Материалы международной научно-практической конференции, Тверь, 30 сентября 2019 года. – Тверь: Тверской государственный университет, 2019. – С. 279-284. – EDN ERZGHF.

16. Рязанцев, А.И. Механизация полива широкозахватными дождевальными машинами кругового действия в сложных условиях [Текст] / А.И. Рязанцев. – Рязань: Рязаньагроинформ, 1991. – 131 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001598513?ysclid=losvjpkz1z878448393>.

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023683213 Российская Федерация. Определение производительности дождевальных машин и установок : заявл. 16.08.2023 : опубл. 03.11.2023 / А. О. Антипов, А. И. Рязанцев, Е. Ю. Евсеев [и др.] ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего образования Московской области "Государственный социально-гуманитарный университет". – EDN WMWNAУ.

18. СТО АИСТ 11.1 – 2010. Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные. Методы оценки функциональных показателей / ФГБНУ «Росинформагротех». – М., 2012. – 54 с.

19. Технические условия ТУ 4734-350-00008064-2005 / Машина дождевальная электрифицированная круговая «Кубань-ЛК1» // ФГНУ ВНИИ «Радуга» - Коломна, 2005.

20. 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.

### References

1. GOST 8224-1-2004. Sprinklers are mobile. Part 1. Operational characteristics and methods of laboratory and field testing. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200044530>

2. Evseev E.Yu., Ryazantsev A.I., Rembalovich G.K., Antipov A.O., Murog I.A. Technical solutions to increase the productivity of a multifunctional circular machine on sloping areas // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. 2023. T 15, No. 2, pp. 119-124 [https://doi.org / 10.36508/ RSATU.2023.72.87.016](https://doi.org/10.36508/RSATU.2023.72.87.016) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54188403> .

3. Evseev, E. Y. Improving the productivity of a multifunctional circular machine on slopes / E. Y. Evseev, A. I. Ryazantsev // Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev. – 2023. – Vol. 15, No. 4. – pp. 121-127. – DOI 10.36508/RSATU.2023.92.77.016. – EDN VPSSQO.

4. Evseev, E. Y. Improving the efficiency of using a multifunctional machine on sloping areas / E. Y. Evseev // Field of the Volga region. – 2023. – № 2(66). – DOI 10.36461/NP.2023.66.2.005. – EDN JDPPNM.

5. Zhuravleva, L. A. Studies of water flow parameters in the pipeline of wide-reach sprinkler machines / L. A. Zhuravleva, B. Heirbeik // Agrarian Scientific Journal. – 2023. – No. 1. – pp. 136-143. – DOI 10.28983/asj.y2023i1pp136-143. – EDN UIPXRK.

6. Zhuravleva, L. A. Modeling of water movement in rotating sprinklers of wide-scope sprinklers / L. A. Zhuravleva, I. A. Popkov, M. S. Magomedov // Environmental management. – 2022. – No. 3. – pp. 48-53. - DOI 10.26897/1997-6011-2022-3-48-53. – EDN JPZYCQ.
7. Ivanov M.N. Wave gears. Moscow: Higher School, 1981. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001063959?ysclid=losuwzf4b7441652634>.
8. Electrified circular sprinkler machine "Kuban-LK1" / Technical specifications TU 4734-350-00008064-2005 // FGNU VNII "Raduga" - Kolomna, 2005.
9. Simulation of neurocontrol of sprinkler speed. Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N., Bakirov S.M. // Agrarian Scientific journal.-2020.-N 7.-pp. 81-84.-Res. English-Bibliogr.: p.84. Cipher P3695 // Engineering and technical support of the agro-industrial complex. Abstract journal. – 2021. – No. 3. – p. 596. – EDN FCXFFY.
10. Riazantsev A. I., Zazulya A. N., Evseev E. Yu. Evaluation of the parameters of the Kuban-LK1 running system when leveling the track [et al.] // Science in Central Russia. – 2023. – № 1(61). – Pp. 116-123. – DOI 10.35887/2305-2538-2023-1-116-123. – EDN QERBKM.
11. 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.
12. Utility Model Patent No. 204128 U1 Russian Federation, IPC A01G 25/09, B05B 1/30. Circular multi-support sprinkler machine : No. 2020143686 : application no. 12/28/2020 : published 05/11/2021 / 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". – EDN NOARXY.
13. Utility Model Patent No. 230829 U1 Russian Federation, IPC A01G 25/09. Multi-support circular sprinkler machine : No. 2024127534 : application 18.09.2024 : published 20.12.2024 / A. I. Ryazantsev, S. S. Turapin, E. Yu.

Evseev, S. O. Berezhnoy ; applicant Federal State Budgetary Scientific Institution "All-Russian Scientific Research Institute of Irrigation Systems and Agricultural Water Supply "Raduga". – EDN FXEMLK.

14. Resource-saving energy-efficient environmentally safe technologies and irrigation equipment: reference. - M.: FSBI "Rosinformagrotech", 2015. – 264 p. URL: [https://rusneb.ru/catalog/000199\\_000009\\_008275977/?ysclid=losvbm3tj149381548](https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_008275977/?ysclid=losvbm3tj149381548).

15. Ryazantsev, A. I. Features of the choice of gearboxes for use in the drives of the support trolleys of the Kuban - LK1 wide-reach sprinkler machine / A. I. Ryazantsev, A. O. Antipov, E. Yu. Evseev // Highly productive and environmentally friendly agriculture on reclaimed lands : Proceedings of the international scientific and practical conference, Tver, September 30, 2019. Tver: Tver State University, 2019. pp. 279-284. EDN ERZGHF.

16. Ryazantsev, A.I. Mechanization of irrigation by wide-range circular sprinkler machines in difficult conditions [Text] / A.I. Ryazantsev. – Ryazan: Ryazanagroinform, 1991. – 131 p. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01001598513?ysclid=losvjpkz1z878448393>.

17. Certificate of state registration of the computer program No. 2023683213 Russian Federation. Determination of the productivity of sprinkler machines and installations : application 08/16/2023 : published 11/03/2023 / A. O. Antipov, A. I. Ryazantsev, E. Yu. Evseev [et al.] ; applicant State Educational Institution of Higher Education of the Moscow region "State Socio-Humanitarian University". – EDN WMWNAY.

18. HUNDRED STORK 11.1 – 2010. Testing of agricultural machinery. Sprinkler machines and installations. Methods for assessing functional indicators / FSBI "Rosinformagrotech", Moscow, 2012– 54 p.

19. Technical specifications TU 4734-350-00008064-2005 / Electrified circular sprinkler machine "Kuban-LK1" // Federal State Scientific Research Institute "Raduga" - Kolomna, 2005.

20. 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.

© *Рязанцев А.И., Евсеев Е.Ю., Антипов А.О., Малько И.В., 2026. International agricultural journal, 2026, № 3, 184-208.*