
НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ

УДК 621: 631.3

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ ШИРОКОЗАХВАТНЫХ ДОЖДЕВАЛЬНЫХ МАШИН

© 2024 г. Л. А. Журавлева

*Российский государственный аграрный университет –
МСХА им. К.А. Тимирязева, Москва, Россия
e-mail: dfz@yandex.ru*

Поступила в редакцию 27.05.2023 г.

После доработки 08.10.2023 г.

Принята к публикации 20.10.2023 г.

Одним из перспективных и актуальных направлений при проектировании широкозахватных дождевальных машин является принцип ресурсосбережения. В статье определены направления совершенствования конструктивно-технологических параметров дождевальной техники на основе принципов ресурсосбережения и сформирована концепция разработки дождевальной техники исходя из условий эксплуатации. Проведенные исследования позволили усовершенствовать ферменные конструкции модельного ряда дождевальных машин “КАСКАД”. Снижение материалоемкости основано на оптимизации параметров пролетов и ферменных конструкций, для чего были предложены коэффициенты металлоемкости фермы и массы угольников. Усовершенствование ферменной конструкции позволило увеличить длину пролета на 22.1–33.8% при незначительном увеличении массы на 5.8–15.1%.

Ключевые слова: ферменная конструкция, дождевальная машина, пролет, ресурсосбережение, металлоемкость

DOI: 10.31857/S0235711924010071, **EDN:** SMYBSK

Актуальность. Многие еще работающие в полях широкозахватные дождевальные машины, спроектированные в советское время, уже не отвечают современным требованиям и зачастую не обеспечивают качественный полив сельскохозяйственных культур.

Крайне необходим новый подход при проектировании. Важны не только модернизация и восстановление дождевальных машин советского периода, важны разработка и производство нового ряда надежных и качественных машин. Одним из перспективных и актуальных направлений является принцип ресурсосбережения.

Разрабатываемые конструкции современных дождевальных машин должны обеспечить экономию материальных ресурсов, снижение эксплуатационных расходов, уменьшение потребления энергии, сокращение трудозатрат на обслуживание и др.

Целью является разработка методики проектирования широкозахватных дождевальных машин кругового действия на основе принципов ресурсосбережения.

Были поставлены и решены следующие задачи: 1) определить направления совершенствования конструктивно-технологических параметров дождевальной техни-

ки на основе принципов ресурсосбережения; 2) сформировать концепцию разработки дождевальной техники в зависимости от условий эксплуатации (среды).

Исследований в области конструирования широкозахватной дождевальной техники крайне мало. В основном они направлены на определение качественных показателей полива.

Работы Н.Ф. Рыжко [1, 2], В.К. Губера [3], В.А. Черноволова, Л.В. Кравченко [4] и др. ученых посвящены совершенствованию насадок и дождевальных аппаратов, их расстановке вдоль водопроводящего пояса.

В работах Ю.Ф. Снипича [5], А.И. Рязанцева [6], С.С. Турапина, Г.В. Ольгаренко, А.О. Антипова [7], А.И. Есина, В.А. Соловьева [8], D.L. Martin [9], P.M. Varsha, A. Varsha, H.V. Shubhu [10], N.A. Mat Leh, M.S. Ariffudin Mohd, Z. Muhammad [11], M.D. Zakari, M.M. Maina, M.S. Abubakar, N.J. Shanono, I. Lawan, M.A. Tadda, N.M. Nasidi [12] и др. рассмотрены вопросы модернизации дождевальных машин.

Большинство научных положений основываются на полученных эмпирических данных для конкретных моделей машин; дождевальных аппаратах, условиях работы.

Очевидно, что помимо модернизации уже существующих технических средств полива необходимо разработать новые современные модели, доступные по цене, обеспечивающие качественное и экологически безопасное орошение.

Материалы и методы. Ориентируясь на ресурсосбережение, можно выделить основные методы и направления развития машин.

Направления развития дождевальных машин с позиции ресурсосбережения:

1. Водные ресурсы. Методы: 1) снижение интенсивности водоподачи; 2) улучшение качества полива путем повышения равномерности увлажнения; 3) формирование благоприятной среды обитания растений.
2. Земельные ресурсы. Методы: 1) увеличение коэффициента земельного использования; 2) снижение эрозии почв за счет улучшения качества дождя; 3) уменьшение воздействия ходовых систем на почву.
3. Материальные ресурсы. Методы: 1) уменьшение материалоемкости дождевальных машин за счет совершенствования конструкции и применения альтернативных материалов.
4. Энергетические ресурсы. Методы: 1) повышение эффективности использования приводов; 2) применение низконапорных дождевальных машин.
5. Трудовые ресурсы. Методы: 1) повышение эффективности автоматической системы управления; 2) повышение производительности.

Таким образом, можно выделить направления совершенствования: 1) дождевальные направления на низком напоре; 2) приповерхностный полив; 3) разработка конструкций низконапорных дождевателей; 4) оптимизация ферменной конструкции с водопроводящим трубопроводом, рациональная расстановка дождеобразующих устройств; 5) оптимизация ходовых систем; 6) оптимизация системы привода; 7) совершенствование автоматической системы управления.

Кратко рассмотрим некоторые. *Водосбережение и энергосбережение.* Уже мировой тенденцией является перевод систем орошения на низкий напор и использование низконапорной дождевальной техники, имеющей свои конструктивные особенности.

Например, известно, что при снижении рабочего давления машины с 0.7 до 0.45 МПа уменьшается давление на насосной станции на 16%, а годовой расход электроэнергии на 13% [2].

Сбережение земельных ресурсов. Коэффициент земельного использования (КЗИ) отчасти характеризует технический уровень системы орошения и, в частности, дождевальной машины. Чем меньше величина площади отчуждения под коммуникации, системы трубопроводов, колеи колес опорных тележек дождевальных машин, тем выше КЗИ [8].

Необходима оптимизация параметров ходовых систем, совершенствование автоматической системы выравнивания, обеспечение полива углов участка.

Материальные ресурсы. Широкозахватная дождевальная техника металлоемкая и достаточно дорогая. Примерно 60–75% веса приходится на ферменную конструкцию с водопроводящим трубопроводом, что говорит о важности ее оптимизации.

Металлоемкость дождевальных машин, т/га, можно выразить как

$$M = \Sigma m / S, \quad (1)$$

где Σm – масса машины, т; S – площадь полива, га.

Количество ходовых тележек

$$n_T = \left(\frac{L - \ell_K}{\ell} \right), \quad (2)$$

где L – длина машины; ℓ – расстояние между ходовыми тележками (длина пролета); ℓ_K – длина консоли.

Масса ферменной конструкции с водопроводящим трубопроводом

$$m_B = m_1(L - \ell_K), \quad (3)$$

где m_1 – средняя масса ферменной конструкции с водопроводящим трубопроводом.

Очевидными путями снижения металлоемкости машины являются: 1) увеличение пролетов между тележками (уменьшение количества тележек); 2) уменьшение массы ферменной конструкции с водопроводящим трубопроводом за счет усовершенствования конструкции и применения трубопровода с переменным диаметром по длине.

Представим конструктивный коэффициент массы машин как отношение общей массы к массе ферменной конструкции с водопроводящим трубопроводом, имеющий незначительные колебания между модификациями и составляющий для дождевальной машины “Фрегат” 4.13–4.62 и для дождевальной машины “Кубань” 3.17–3.97.

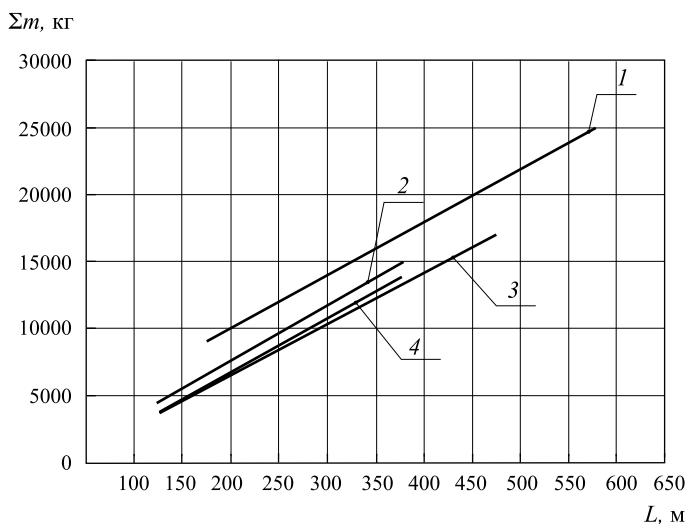


Рис. 1. Зависимость массы модификаций “Кубань” и “КАСКАД” от длины: 1 – “Кубань-ЛК1” (пролет длиной 48.7 м); 2 – МДЭК “Кубань-ЛК1М” (“КАСКАД”) (пролет длиной 48.7 м); 3 – ДМ “КАСКАД” (пролет длиной 59.5 м); 4 – ДМ “КАСКАД” (пролет длиной 65.25 м).

Представив зависимость массы широкозахватной дождевальная машины от ее длины для модификаций с разными длинами пролетов, можно заметить, насколько увеличение длины пролета способствует уменьшению массы машины, соответственно и стоимости (рис. 1).

При этом длина пролета ограничивается прочностью системы, весом, влияющим на удельное давление на почву, глубину колеи, и условиями эксплуатации, например, рельефом и др.

В качестве показателя, характеризующего конструктивное совершенство ферменной системы, введем показатель — коэффициент металлоемкости ферменной конструкции:

$$K_M = \frac{\sum P}{l}, \quad (4)$$

где $\sum P$ — сумма периметров угольников на пролет, м; l — длина пролета, м.

Показатель, характеризующий массу угольников ферменной конструкции:

$$K_\Delta = \frac{\sum m_\Delta}{l}, \quad (5)$$

где $\sum m_\Delta$ — масса всех угольников на пролет, м.

Результаты расчетов сведены в табл. 1. На дождевальных машинах типа “Кубань” и “КАСКАД” используются два типа ферменных конструкций: 1) первый тип — на ДМ “Кубань-ЛК1” и “Кубань-ЛК1М” с пролетами длиной 48.7 м, в поперечном сечении равнобедренный треугольник с разными длинами стоек и раскосов; 2) второй тип — на ДМ “КАСКАД” с пролетами длиной 59.5 и 65.2 м, в поперечном сечении равнобедренный треугольник с равновеликими тягами, раскосами и креплением в одной точке (рис. 2).

Таблица 1. Характеристики ферменной конструкции

Тип дождевальной машины	“Кубань-ЛК1”, “Кубань-ЛК1М” (“КАСКАД”)	“КАСКАД” (пролет 59.5 м)	“КАСКАД” (пролет 65.25 м)
Масса угольников ферменной конструкции на пролет, кг	198.12	209.74	228.21
Периметр ферменной конструкции на пролет, м	58.79	62.24	67.72
Длина пролета, м	48.7	59.5	65.25
Коэффициент металлоемкости ферменной конструкции	1.20	1.04	1.04
Коэффициент массы угольников	4.0	3.5	3.5
Процент увеличения длины пролета, %	0	22.1	33.8
Процент увеличения массы угольников на пролет, %	0	5.8	15.1

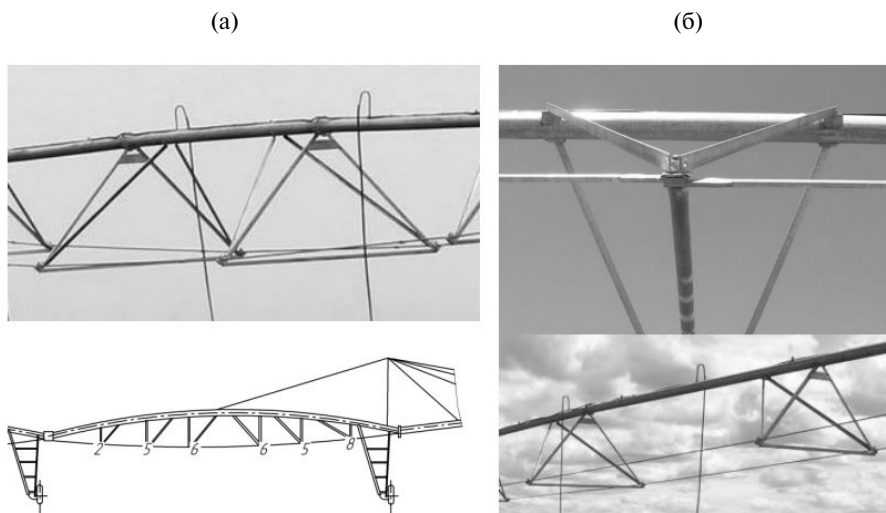


Рис. 2. Два типа ферменных конструкций: (а) – “Кубань-ЛК1М”; (б) – “КАСКАД”.

Оптимизация ферменной конструкции позволяет увеличивать длину пролета на 22.1–33.8% при увеличении массы на 5.8–15.1%.

Трудовые ресурсы. Зависят главным образом от качества и функциональности системы автоматизации, позволяя уменьшать трудоемкие ручные работы, управлять работой нескольких дождевальных машин дистанционно.

Таким образом, кратко изложенные взаимозависимости позволили наметить направления совершенствования и оптимизации с точки зрения ресурсосбережения.

Широкозахватную дождевальную машину проще всего рассматривать как объект проектирования по требованиям, предъявляемым условиями эксплуатации (параметрами среды).

Технические характеристики дождевальной машины (вес, форма, размер), т. е. конструкцию необходимо подобрать под условия эксплуатации, т. е. определить требования среды. Кроме того, они должны быть согласованы с уровнем развития технических средств, т. е. быть не ниже существующих аналогов (рис. 3).

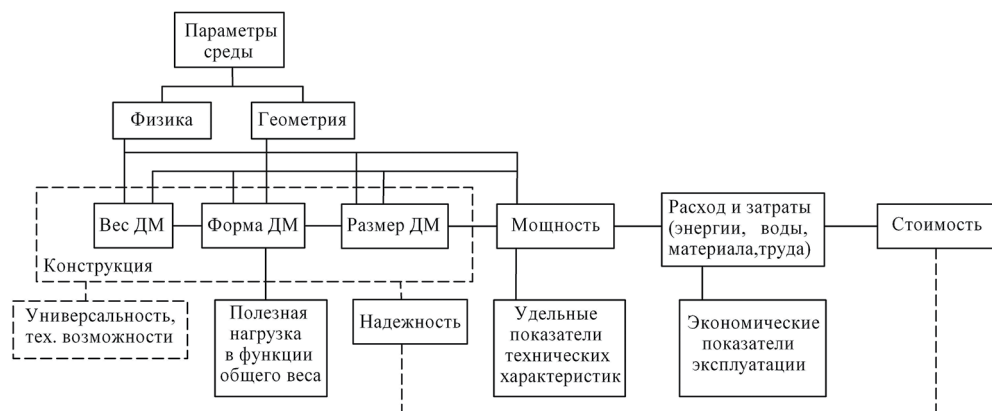


Рис. 3. Концепция проектирования широкозахватной дождевальной техники.

Таблица 2. Показатели дождевальных машин

Наименование показателя	Размерность
→ min	
Энергоемкость орошения на 1000 м ³ воды	кВт·ч/1000 м ³
Удельный расход энергии	кВт/га
Затраты мощности	кВт
Металлоемкость	т/га
Конструктивный коэффициент массы машины	—
Коэффициент массы угольников	—
Коэффициент металлоемкости ферменной конструкции	—
Трудоемкость обслуживания, ТО и ремонтов	чел.-ч
Затраты труда	чел.-ч
Капитальные вложения на 1000 м ³ воды	руб./1000 м ³
Капитальные вложения	руб.
Коэффициенты недостаточного и избыточного полива	
Средняя мощность дождя	Вт/м ²
Средняя интенсивность дождя	мм/мин
Ширина и глубина колеи	м
Повреждаемость растений	%
Количество обслуживающего персонала	чел.
Потери воды на испарение и снос	%
→ max	
Норма полива до стока	м ³ /га
Время полива до стока	мин
Степень использования земельных ресурсов (КЗИ)	КЗИ ≥ 0.97
Наработка на отказ	ч
Производительность труда	га/ч
Срок службы	лет
Коэффициент готовности дождевальных машин к работе	K _г ≥ 0.96
Коэффициент использования сменного времени	K _{см} > 0.95
Коэффициент эффективного полива	K _{эп} > 0.85

Параметры дождевальной машины через категории “вес”, “форма” и “размер” задают мощность, необходимую на привод машины, т. е. характеризуют конструкцию, которая и определяет надежность, универсальность и технические возможности, что влияет на стоимость технического средства.

Потребляемая мощность является определяющей для категории “расход и затраты”, и замыкается цепочка оценкой фактора целесообразности — общей стоимостью.

Категорию, характеризующую условия эксплуатации, т. е. “параметры среды”, можно разделить на две подкатегории: физику (например, физико-механические свойства почвы) и геометрию (геометрические параметры поля, рельеф местности, высота растений и др.).

Параметр “физика” среды является определяющим и лимитирующим параметром “физики” объекта проектирования. Например, физико-механические свойства почвы (“физика”) ограничивают вес дождевальной машины, задавая параметры ходовых систем.

Таблица 3. Основные технические характеристики машин

Наименование показателей	Показатель	
1	2	3
Условное наименование	“Ку- бань-ЛК1М” (“КАСКАД”)	“КАСКАД”
Привод передвижения машины	Электромеханический, реверсив- ный, мотор-редукторы	
Источник питания	380 В, 50 Гц	
Скорость движения последней тележки в пределах, м/с, (м/мин)	$(1.61-30.0) \cdot 10^{-3}$	
Дорожный просвет, мм, не менее	450	
Расстояние до нижнего пояса металлоконструкции, м	2.7	2.8–2.9
Механическая повреждаемость растений, %, не более	1.0	
Диаметры водопроводящего трубопровода, мм	159	219, 203, 168, 159, 133
Диаметры труб консоли, мм	133	133, 114, 108, 89
Длины пролетов, м	48.7	48.7, 59.5, 65.25
Максимальная длина машины, м (с консолью 31 м)	518	553
Колесная база, мм	3700	3700, 4200
Максимальная длина консоли, м	31	
Расход воды, л/с	до 90	
Давление воды на входе в машину, МПа, при длине 500 м	0.43	
Колеса самоходных тележек	пневматические	
Мотор-редукторы	УМС	
Колесные редукторы самоходных тележек, тип	червячные	
Расположение органов оперативного управления	с щита управления и дистанционный	
Режимы движения машины	старт-стопный	
Интенсивность дождя средняя, мм/мин, не более	0.66	
Норма полива за проход, м ³ /га	95–600	
Минимальное время оборота машины, ч, при длине 500 м	32.8	

Параметр “геометрия” среды также является определяющим и лимитирующим параметром “геометрии” объекта проектирования. Размеры поливного участка, рельеф местности, высота растений задают форму и размеры дождевальной машины (ее длину, конструктивно-высотные свойства).

Причем совершенство конструкции определяет полезную нагрузку от функции общего веса машины.

Конструкция задает требуемую мощность, группу “расход и затраты”, т. е. расход энергии, воды, материалов на изготовление самой конструкции, затраты труда на обслуживание. Конструкция и мощность во многом характеризуют показатели уровня техники и возможности ресурсосбережения как при изготовлении самой машины, так и в процессе эксплуатации, работы машины.

Важно определить взаимосвязь между принимаемыми конструктивными решениями, вытекающим ресурсосберегающим потенциалом и лимитирующими факторами.

Показатели технического уровня качества дождевальных машин и оценочные показатели их работы можно разделить на группы, стремящиеся к минимуму или к максимуму (табл. 2).

На основании представленных исследований предприятием ООО “Мелиоративные машины” были спроектированы и запущены в производство дождевальные машины “Кубань-ЛК1М” (“КАСКАД”) и “КАСКАД” [8].

Результаты исследований. Технические характеристики “Кубань-ЛК1М” (“КАСКАД”) приведены в табл. 3. На ее основании была разработана серия ДМ “КАСКАД” с усовершенствованной ферменной конструкцией. Пролеты были увеличены до 59.5 и 65.2 м (рис. 4).



Рис. 4. Дождевальная машина “КАСКАД”.

Оптимизация ферменной конструкции позволила увеличить длину пролета на 22.1–33.8% при незначительном увеличении массы на 5.8–15.1%.

Заключение. Важнейшим критерием конкурентоспособности является рациональное использование воды, земли, материалов, энергии, труда и средств как на стадии их создания, так и в процессе их обслуживания и эксплуатации.

Проведенный анализ позволил определить критерии эффективности и выделить направления совершенствования, разработать концепцию проектирования широкозахватной дождевальной техники.

Снижение материалоемкости основано на оптимизации параметров пролетов и ферменных конструкций, для чего были предложены коэффициенты металлоемкости фермы и массы угольников.

Проведенные исследования позволили усовершенствовать ферменные конструкции модельного ряда дождевальных машин “КАСКАД”.

Финансирование работы. Работа выполнена за счет средств Программы развития университета в рамках программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Рыжко Н. Ф.* Совершенствование технических средств и технологии орошения в Поволжье: монография. Саратов: Саратовский источник, 2007. 110 с.
2. *Рыжко Н. Ф., Рыжко С. Н. и др.* Ресурсосбережение – как основа совершенствования многоопорных дождевальных машин // *Природообустройство*. 2022. № 1. С. 12.
3. *Губер К. В.* Ресурсосберегающие технологии и конструкции оросительных систем при дождевании: Дис. ... д-ра техн. наук. М.: ФГБНУ ВНИИГиМ, 2000. 518 с.
4. *Черноволов В. А., Кравченко Л. В.* Математическое моделирование процессов распределения жидкостей в агротехнологиях: монография. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт, Донской ГАУ, 2016. 208 с.
5. *Снипич Ю. Ф.* Интенсификация технологий и совершенствование технических средств орошения дождеванием: Дис. ... д-ра техн. наук. Новочеркасск: ФГНУ РосНИИПМ, 2011. 340 с.
6. *Рязанцев А. И., Зазуля А. Н., Евсеев Е. Ю. и др.* Оценка параметров ходовой системы “Кубань-ЛК1” при заравнивании колеи // *Наука в центральной России*. 2023. № 1. С. 116.
7. *Турапин С. С., Ольгаренко Г. В. и др.* Эколого-энергетическое совершенствование многоопорных дождевальных машин // *Мелиорация и водное хозяйство*. 2021. № 3. С. 30.
8. *Есин А. И., Журавлева Л. А., Соловьев В. А.* Ресурсосберегающие технологии и дождевальные машины кругового действия: монография. Саратов: Амирит, 2019. 214 с.
9. *Martin D. L., Kincaid D. C., Lyle W. M.* Design and operation of sprinkle systems // *ResearchGate*. 2007. Т. 16. Р. 557. <https://doi.org/10.13031/2013.23699>
10. *Varsha P. M., Varsha A., Shubha H. V.* Parneeth charanthimath, “Smartphone based Automatic Irrigation System” // *Int. J. of Engineering Research & Technology*. 2018. V. 6. Iss. 15. P. 1.
11. *Mat Leh N. A., Ariffudin Mohd M. S., Muhammad Z.* Smart Irrigation System Using Internet of Things // 2019 IEEE 9th Int. Conf. on System Engineering and Technology (ICSET), 7 Oktober 2019, Shah Alam, Malaysia. P. 96. <https://doi.org/10.1109/icsengt.2019.8906497>
12. *Zakari M. D., Maina M. M., Abubakar M. S. et al.* Design, Construction and Installation of Sprinkler Irrigation System // *J. of the Faculty of Engineering*. 2012. V. 7. № 1–2. P. 109.