

Экспериментально-теоретические исследования системы «норма полива – почва – дождевальная машина»

Лариса Анатольевна Журавлева, Игорь Анатольевич Попков, Мурад Салмандибирович Магомедов
ФГБОУ ВО РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия
e-mail: dfz@yandex.ru

Аннотация. Вопросы, связанные с мелиорацией, являются актуальными за счет ввода в действие новых орошаемых площадей. Конкуренентоспособность российской ирригационной техники полива может быть обеспечена лишь при значительном повышении надежности и экологически безопасной процесса полива. Целью является повышение экологической безопасности полива широкозахватной дождевальной техникой за счет совершенствования конструктивно-технологических параметров на основе исследований системы «норма полива–почва–дождевальная машина». В работе дана методика уточнения и повышения экологической безопасности нормы полива, оптимизированы конструктивные параметры водопроводящего трубопровода и типы ходовых систем в зависимости от несущей способности почвы и досточковой нормы.

Ключевые слова: дождевальные машины; досточковая норма; норма полива; почва; ходовые системы.

Для цитирования: Журавлева Л. А., Попков И. А., Магомедов М. С. Экспериментально-теоретические исследования системы «норма полива – почва – дождевальная машина» // Аграрный научный журнал. 2022. № 9. С. 96–103. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i9pp96-103>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

Experimental and theoretical studies of the system “irrigation norm – soil – sprinkler machine”

Larisa A. Zhuravleva, Igor A. Popkov, Murad S. Magomedov
Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russia
dfz@yandex.ru

Abstract. Issues related to land reclamation are relevant due to the commissioning of new irrigated areas. The competitiveness of Russian irrigation technology can be ensured only with a significant increase in the reliability and environmentally safe irrigation process. The goal is to increase the environmental safety of irrigation with wide-coverage sprinkler equipment by improving the design and technological parameters based on studies of the “irrigation norm-soil-sprinkler machine” system. In the article, a methodology is given for clarifying and improving the environmental safety of the irrigation norm, the design parameters of the water supply pipeline and the types of running systems are optimized depending on the bearing capacity of the soil and the flow rate.

Keywords: sprinklers; sufficient standard; irrigation rate; soil; running systems.

For citation: Zhuravleva L. A., Popkov I. A., Magomedov M. S. Experimental and theoretical studies of the system “irrigation norm – soil – sprinkler machine”. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2022;(9): 96–103. (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2022i9pp96-103>.

Введение. Данные об негативных последствиях для экологического состояния почв при поливе дождевальной техникой, были замечены еще в 1980–1990-е гг. [1–4].

Это процессы подъема уровня грунтовых вод, изменения водного, солевого, воздушного, питательного режимов и формирования на значительных площадях условий, при которых неизбежны процессы переувлажнения и вторичного засоления [5–7].

Н. А. Пронько и Л. Г. Романова утверждают, что длительное орошение темно-каштановых почв приводит к снижению содержания гумуса, ухудшению его качества [8, 9].

Авторы многих исследований доказывают, что в орошаемых почвах под влиянием поливной воды происходят изменения и агрохимических свойств [10–12].

Сравнение почвообразовательных процессов при длительном орошении В.Н. Щедрина, Л.М. Докучаева и Р.Е. Юркова показало, что большая часть неблагоприятных почвенных процессов проявляется при использовании повышенных норм орошения. Особенно ярко эти процессы проявляются на черноземах [5].

Увеличение доли земель неудовлетворительного состояния требует применения техники орошения сохраняющей плодородие почв, исключающей поверхностный сток, заболачивания и вторичного засоления земель [13–16].

Совершенствованию дождевальной техники за счет оптимизации их конструктивных решений и технологических параметров посвящены работы известных ученых С.Х. Гусейн-Заде, Б.М. Лебедева, Н.Ф. Рыжко, В.И. Городничева, Б.П. Фокина, А.И. Рязанцева, И.В. Малько, А.О. Антипова, Ю.Ф. Снопича, Г.В. Ольгаренко [10, 12, 17–19, 20–24, 25–29].

Следует однако отметить, что эти исследования в основном носят частный характер. Необходимо выполнить оптимизацию конструктивных параметров широкозахватных дождевальных машин для различных условий эксплуатации.

Конструктивно-технологические параметры должны задаваться в зависимости от условий эксплуатации, структуры севооборота, естественной увлажненности территории, экологического состоянием земель и др.

Цель исследования – повышение экологической безопасности полива широкозахватной дождевальной техникой за счет совершенствования конструктивно-технологических параметров на основе исследований системы «норма полива – почва – дождевальная машина».



Методика исследований. Упрощенная система выбора основных параметров дождевальной машины или ее модели представлена на рис. 1.

Выращиваемая сельскохозяйственная культура определяет необходимую норму полива. Это тот минимальный объем воды, который необходим для роста и развития растений, и меньше которого полив не целесообразен.

Второй элемент системы – это почва с определенными характеристиками и определяющая достоящую норму. Величина достоящей нормы также является ограничением, только уже максимального значения объема поданной воды.

Почва в своем увлажненном состоянии характеризуется несущей способностью, которая является важным критерием для выбора конструктивных параметров техники.

Норма полива позволяет задать расход воды, проходящий по трубопроводу, соответственно и конструктивные параметры трубопровода и массу машины в целом.

Зная массу машины и несущую способность почвы, можно выбрать оптимальные значения длины пролета и тип ходового оборудования, обеспечивающего удельное давление на почву в пределах допустимых значений, что будет способствовать снижению глубины колеи и свободному перемещению машины.

Первостепенно необходимо оптимизировать значение поливной нормы, определяющие расход проходящий по трубопроводу. Постоянная норма полива зачастую не соответствует требуемым величинам недостающей влаги на различных участках поля в различные моменты времени.

Часто это приводит к переполивам, водной эрозии, выносу питательных веществ с поверхностным стоком, частичному заболачиванию и вторичному засолению земель.

Изменение поливной нормы должно быть обеспечено в соответствии с уровнем влагозапасов участков поля.

В начале вегетационного периода влагозапасы определяются как [30, 32], м³/га:

$$W_0 = 100\gamma h\beta_H \quad (1)$$

где γ – плотность почвы, кг/м³; h – увлажненный слой почвы, мм; β_H – влажность почвы равная наименьшей влагоемкости, %.

Уравнение водного баланса суммарного водопотребления E_t , мм [30, 32, 33]:

$$E_t = (W_0 - W_K) + M + P_{OC} + V - \Pi_0, \quad (2)$$

где W_K – конечные влагозапасы, м³/га; M – поливная норма; P_{OC} – осадки; V – объем грунтовых вод; Π_0 – потери воды на фильтрацию и сток, м³/га. Не учитываем их для упрощения.

Тогда:

$$W_K = W_0 - Et, \quad (3)$$

t – время от начала полива до перемещения дождевальной машины к конечной точке полива, сут.

Конечная точка полива для широкозахватных дождевальных машин зависит от выбранной схемы движения. При поливе машинами кругового действия это время оборота машины.

При превышении суммарного испарения за сутки запаса продуктивной влаги должен быть осуществлен полив.

Полвиная норма определяется по формуле [30, 32], м³/га:

$$M = 100h\gamma(\beta_{HB} - \beta_{0,8HB}), \quad (4)$$

β_{HB} – влажность, соответствующая наименьшей влагоемкости; $\beta_{0,8HB}$ – влажность, соответствующая предполивному порогу 80% HB.

Условием полива является выражение [30, 32]:

$$\beta_H \leq \beta(\varphi, t) \leq 100\% \text{ HB}, \quad (5)$$

$\beta(\varphi, t)$ – влажность почвы в точке с угловой координатой φ в момент времени t , %HB.

Условие выдачи заданной поливной нормы за несколько проходов [30, 32]:

$$M = M_1(\varphi) + M_2(\varphi) + M_3(\varphi) + \dots + M_n(\varphi), \quad (6)$$

M – заданная поливная норма, м³/га; $M_1(\varphi)$ – поливная норма в точке начала движения, м³/га; $M_2(\varphi)$, $M_3(\varphi)$ – поливная норма за второй и третий проходы, м³/га; $M_n(\varphi)$ – поливная норма за n -й проход.

При поливе машиной кругового действия не по полному кругу, а с реверсом, как правило, возникает повышенный сток за счет полива той же нормой в начале возврата.

При движении дождевальной машины в прямом направлении начальные влагозапасы при $t = 0$ перед машиной будут уменьшаться на $10Et$ [30, 32], сут:

$$(7) \quad t = \frac{1}{1440E} \int_0^{\varphi} \frac{d\varphi}{V(\varphi)},$$

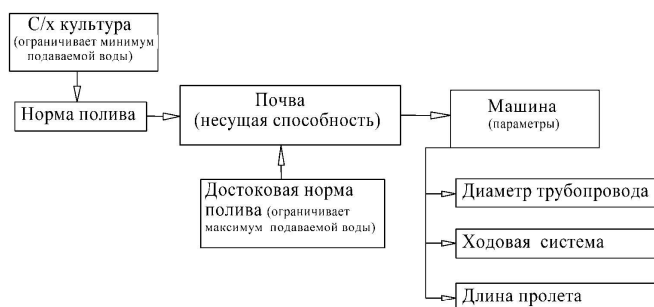


Рис. 1. Система «норма полива – почва – дождевальная машина»





где $V(\varphi)$ – скорость, м/мин; K – коэффициент использования времени.

Слой осадков за оборот [30]:

$$h = \frac{120Q_M}{R_M V}, \quad (8)$$

где Q_M – расход машины, л/с; R_M – радиус полива, равный длине машины, м.

Допустим необходимая поливная норма M [30, 32], м³/га:

$$M/10 = h \quad (9)$$

где h – слой осадков, мм.

$$M = 1200Q_M / R_M V, \quad (10)$$

При перемещении машины по части дуги окружности или сектору l_{CEK} :

$$M'_1 = 2\pi \frac{1200Q_M}{l_{\text{CEK}} V}. \quad (11)$$

Тогда:

$$t = \xi \int_0^\varphi M'_1(\varphi) d\varphi; \quad (12)$$

$$\xi = \frac{s}{432 \cdot 10^3 K Q_M}. \quad (13)$$

Расстояние, пройденное тележкой, – s .

Максимальное расстояние перемещения:

$$s_{\text{MAX}} = l = 2\pi R_M, \quad (14)$$

Мгновенная интенсивность дождя определяется по формуле, мм/мин [30]:

$$\rho_{\text{MT}} = \frac{120 Q_M}{R_M^2 \varphi_C}, \quad (15)$$

φ_C – угол сектора захвата.

Изменение влагозапасов в почве в прямом ходе:

$$f_1(\varphi) = W_0 - 10E\xi \int_0^\varphi M'_1(\varphi) d\varphi. \quad (16)$$

После прохода машины влагозапасы можно найти как

$$W_1 = f_1(\varphi) + M'_1(\varphi), \quad (17)$$

При движении в обратную сторону влагозапасы позади машины можно представить функцией $f_2(\varphi)$:

$$W_2 = f_2(\varphi) + M'_2(\varphi). \quad (18)$$

В точку φ машина вернется через отрезок времени Δt , пройдя расстояние s :

$$\Delta t = \xi \int_\varphi^s [M'_1(\varphi) + M'_2(\varphi)] d\varphi = \xi(s - \varphi)M, \quad (19)$$

$$f_2(\varphi) = f_1(\varphi) + M'_1(\varphi) - 10\xi E(s - \varphi)M. \quad (20)$$

$$f_2(\varphi) = f_1(l) = W_0 = \text{const}, \quad (21)$$

$$\frac{dM'_1(\varphi)}{d\varphi} - 10E\xi M'_1(\varphi) = -10E\xi M, \quad (22)$$

Тогда, учитывая формулу (11), получим:

$$M'_1(\varphi) = 2\pi \frac{1200Q_M}{I_{CEK} V(\varphi)} [1 - e^{10E\xi(\varphi-s)}], \quad (23)$$

$$M'_2(\varphi) = 2\pi \frac{1200Q_M}{I_{CEK} V(\varphi)} e^{10E\xi(\varphi-s)}. \quad (24)$$

Задавая расстояние, проходимое последней тележкой, можно найти оптимизированное значение нормы. Достоковая норма полива, м³/га [23]:

$$m_D = 2850 \cdot (1,14 - d^2) \cdot j_{cp} / j_1 K_1, \quad (25)$$

где d – средний диаметр капель дождя, мм; j_{cp} – интенсивность дождя, мм/мин; j_1 – заданная интенсивность дождя, мм/мин; K_1 – коэффициент водопроницаемости почв.

Несущую способность почвы после полива можно определить по формуле, кПа [23]:

$$P_P = P_D - (1,4m_D^{0,65} + 8 \cdot 1,01 m_{ct}) \quad (26)$$

где P_D – несущая способность до полива, кПа; m_{ct} – величина стока, м³/га.

Глубина колеи, м:

$$H = 0,6M_M / (n_t 10^3 P_P b_0 \sqrt{D_K}) \quad (27)$$

где M_M – масса машины; n_t – количество тележек; b_0 – ширина обода колеса, м; D_K – диаметр колес, м.

Представленная методика позволяет скорректировать норму полива, определив необходимый расход воды, достокую норму полива и с учетом несущей способности почвы выбрать конструктивные параметры машины: диаметр трубопровода, пролет и оптимальное ходовое оборудование для обеспечения минимально возможной глубины колеи.

Методы: аналитическое описание на основе известных законов гидравлики; методика планирования многофакторного эксперимента. При обработке результатов применялись программы Statistica и Microsoft Excel.

Лабораторно-полевые исследования проводили на основе методик ВНИИ «Радуга», ВолжНИИГиМ, СТО АИСТ 11. 1-2010 Испытания сельскохозяйственной техники. Машины и установки дождевальные.

Сравнение стандартной и предлагаемой технологий полива проводили при следующих условиях: почвы темно-каштановые среднесуглинистые. Верхняя часть почвенного профиля уплотнена (1,2–1,4 т/м³). Опыты проводили на двух полях под посевами кукурузы. Орошали машиной «Кубань-ЛК1М» (Каскад). Диаметр водопроводящего трубопровода 159 мм.

Суточное водопотребление можно найти следующим образом [25]:

$$E_s = k_b d_s k_n, \quad (28)$$

где k_b – биоклиматический коэффициент, мм/мб; d_s – среднесуточный дефицит влажности воздуха, мб; k_n – поправочный коэффициент, учитывающий влажность почвы в интервале от НВ до ВЗ.

Несущую способность определяли с помощью ручного почвомер-пенетromетра с конусно-крыльчатый наконечником согласно ГОСТ 19912-2001 «Грунты. Методы полевых испытаний статическим и динамическим зондированием».

Под крайним пролетом машины с помощью дождемеров и стоковых площадок определяли величину стока, достокую и эффективную нормы полива по секторам.

Глубину колеи определяли в начале, середине и конце поливного периода.

Результаты исследований. Экспериментальные исследования проводились на соседних участках полива. Поливная норма при стандартной технологии 400 м³/га.

Поливной период был разбит на декады, в течение которых отмечались осадки и выдаваемая поливная норма.

Оросительная норма по стандартной технологии вносилась за четыре полива по 400 м³/га. Скорректированная оросительная норма в 2019 г. составила 1570 м³/га, в 2020 г. – 1440 м³/га, что соответственно на 30 и 110 м³/га меньше. В 2021 г. – по стандартной технологии вносилась за 4 полива по 500 м³/га. Полученные данные об экономии воды представлены в табл. 1.

Изменением диаметра водопроводящего трубопровода и длины пролета можно регулировать нагрузку, приходящуюся на колесные системы дождевальной техники.

Как показывают проведенные исследования, для работы машин на почвах с повышенной несущей способностью следует устанавливать пневмоколесное ходовое оборудование с узкими профилями. А ходовое оборудование с коле-



Сравнительные данные по оросительной норме по стандартной технологии и оптимизированной подаче воды на одну машину на 1 га

Параметр	2019 г.		2020 г.		2021 г.	
	Стандарт	Оптимизация	Стандарт	Оптимизация	Стандарт	Оптимизация
Оросительная норма, м ³ /га	1600	1570	1600	1440	2000	1790
Экономия, м ³ /га		30		160		210

сами с широкими шинами (18–24, 23–26) рационально применить при орошении большими поливными нормами от 600 м³/га.

Для работы дождевальных машин с уменьшенным диаметром водопроводящего трубопровода (меньше 159 мм) или уменьшенной длиной пролетов (менее 59 м) на почвах с пониженной несущей способностью возможна установка ходового оборудования с колесами узкого профиля.

Зависимость влияния расстояния от неподвижной опоры на глубину колеи при несущей способности почвы 110–125 кПа представлена на рис. 2.

В начале поливного периода глубина колеи уменьшается при увеличении расстояния от неподвижной опоры, а в конце поливного сезона она снова возрастает за счет увеличения расхода воды и размера капель дождя (рис. 3).

При увеличении длины пролета с 48,7 до 59,5 м и смены колес с шинами 14,9–24 на колеса с шинами 16–20 глубина колеи значительно уменьшается.

Экспериментальные исследования показали, что для первой опорной тележки глубина колеи снижается до 4 см в начале поливного сезона и может достигнуть 9 см в конце (рис. 4).

Результаты проведенных экспериментов совпадают с теоретическими и уточняют исследования авторов.

Зная массу водопроводящего трубопровода с водой и несущую способность почвы (табл. 2), следует выбрать верное соотношение длины пролета и оптимального ходового оборудования (рис. 5).

В случае работы машины на местности с уклоном, следует выбирать вариант с меньшей длиной пролета или ходовыми системами шинами большей ширины.

Заключение. На основании исследований взаимосвязи системы «норма полива – почва – дождевальная машина» были оптимизированы соотношения конструктивных параметров водопроводящего трубопровода, длин пролетов и типов ходовых систем в зависимости от норм полива, несущей способности почвы и досточковой нормы.

Выявлены закономерности процесса колееобразования на протяжении всего поливного сезона при поливе разными нормами.

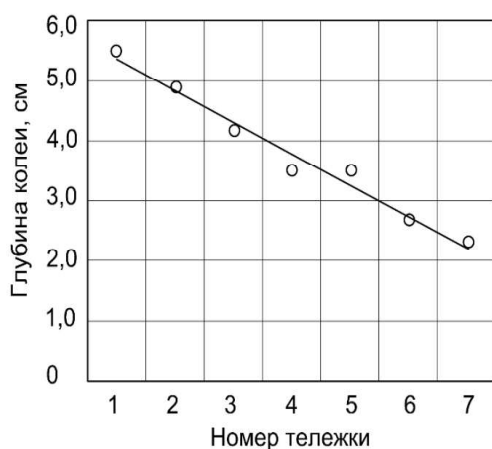


Рис. 2. Влияние расстояния от неподвижной опоры $n_{от}$ на глубину колеи для ДМ «Кубань-ЛК1М»: (пролет 48,7 м, шины 14,9–24), $H = -0,525 n_{от} + 5,9$; $R^2 = 0,976$

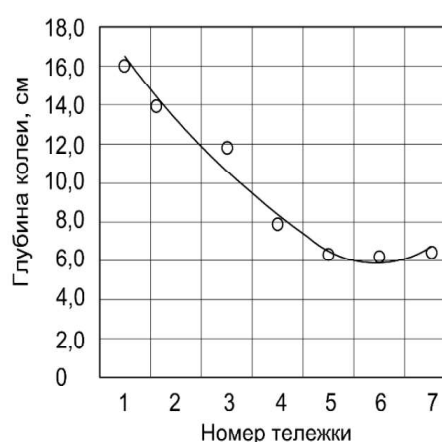


Рис. 3. Влияние расстояния от неподвижной опоры $n_{от}$ на глубину колеи для ДМ «Кубань-ЛК1М» в конце поливного сезона: (пролет 48,7 м, шины 14,9–24), $H = 0,041 n_{от}^3 + 0,023 n_{от}^2 - 3,489 n_{от} + 19,8$; $R^2 = 0,967$

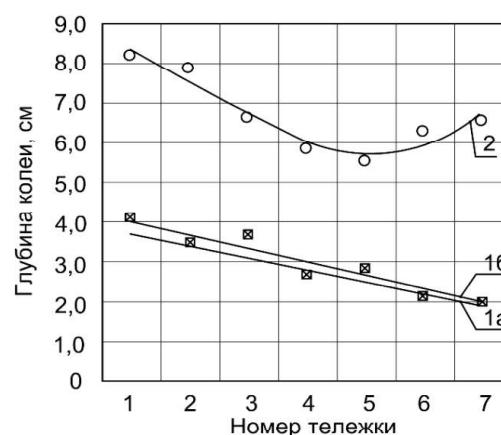


Рис. 4. Влияние расстояния от неподвижной опоры $n_{от}$ на глубину колеи для ДМ «Кубань-ЛК1М» в начале (1) и конце (2) поливного сезона, (пролет 59,5 м, шины 16–20):

1а – теоретически;

1б – экспериментально $-H = -0,275 n_{от} + 3,9$; $R^2 = 0,953$;

2 - $H = 0,03 n_{от}^3 + 0,206 n_{от}^2 - 0,357 n_{от} + 8,871$; $R^2 = 0,935$



Значения несущей способности почвы от режима полива

Тип почвы	Несущая способность почвы до полива $P_{дп}$, кПа	Марка машины	Эффективная норма полива, m_3 , м ³ /га	Достоковая норма полива, $m_{дест.}$, м ³ /га	Величина стока $m_{ст.}$, м ³ /га	Несущая способность почвы после полива $P_{пп}$, кПа	
						Экспериментальная	Теоретическая
Чернозем обыкновенный	150-155	«Кубань-ЛК1»	305	530	0	60	59,4
			400	540	0	58	58,4
			510	535	0	61	58,9
Темно-каштановый суглинок	210-220	«Кубань-ЛК1М» (КАСКАД)	300	380	0	140	135,4
			405	385	20	139	134,9
			500	390	110	119	118,5

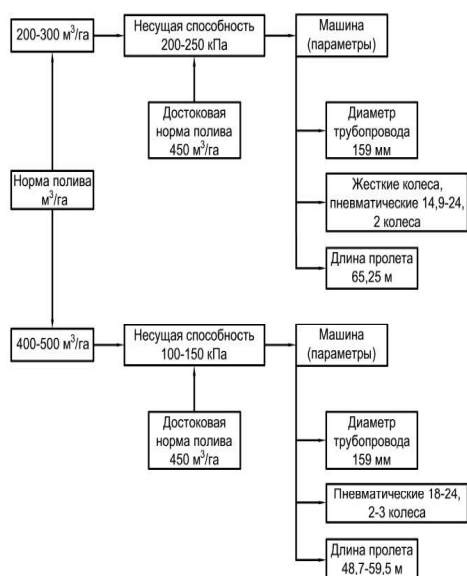


Рис. 5. Выбор параметров по системе «норма полива – почва – дождевальная машина»

При орошении с нормой полива от 300 до 350 м³/га и несущей способности не менее 100 кПа длина пролета может увеличиваться до 65 м, при этом глубина колеи не превышает допустимых значений. Для работы дождевальных машин на почве, обладающей низкой несущей способностью, если на них устанавливается пролет длиной более 59 м тогда на ходовых системах необходимо применить колеса с шинами не менее 16–20, а при уменьшении несущей способности почвы – шины 18–24.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранова Е. В. Гумусовый режим темно-каштановых почв разного хозяйственного использования в условиях Западного Казахстана: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.01, 03.02.13 / Баранова Екатерина Викторовна. СПб.-Пушкин, 2012. 22 с.
2. Оруджева Н. И. Роль многолетних агроценозов в сохранении плодородия орошаемых почв // Почвоведение в России: вызовы современности, основные направления развития: материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием к 85-летию Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. М.: Почв. ин-т им. В. В. Докучаева Россельхозакадемии, 2012. С. 364–367.
3. Приходько В. Е. Орошаемые степные почвы: функционирование, экология, продуктивность. М.: Интеллект, 1996. 180 с.
4. Щедрин В. Н., Васильев С. М. Теория и практика альтернативных видов орошения черноземов юга европейской территории России. Новочеркасск, 2011. 435 с.
5. Щедрин В.Н., Докучаева Л.М., Юркова Р.Е. Негативные почвенные процессы при регулярном орошении различных типов почв // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации. 2018. № 2. С. 1–21.
6. Prikhod'ko V.E., 1996. Oroshaemye stepnye pochvy: funktsionirovanie, ekologiya, produktivnost [Irrigated Steppe Soils: Functioning, Ecology, Productivity]. Moscow, Intellect Publ., 180 p.
7. Запорожниченко Е.В., Изменение почвенно-мелиоративных и гидрогеологических условий Северного Кавказа под воздействием мелиорации и орошения // Мелиорация и орошение почв равного Кавказа: сб. Мелиорация и орошение почв равнинного Кавказа: сб. М., 1986. С. 69–72. (In Russian)
8. Пронько Н. А., Романова А.Г. Приемы восстановления плодородия почв при орошении // Плодородие. 2005. № 4(25). С. 31–32.
9. Романова Л. Г. Влияние длительного орошения на свойства темно- каштановых почв Заволжья и агромелиоративные приемы их улучшения: автореф. дис. ... канд. с.-х. наук: 06.01.02 / Романова Любовь Геннадиевна. Саратов, 2002. 23 с.
10. Ахтырцев Б. П., Лепилин И. А. Влияние орошения на свойства типичных черноземов юговостока Центрально-Черноземной области // Биологические науки. 1979. № 4. С. 87–92.
11. Влияние орошения на свойства черноземов Северного Кавказа / А. Т. Лисконов [и др.] // Мелиорация и водное хозяйство: обзор. информ. / ЦБНТИ Минводстроя СССР. М., 1990. С. 50.





12. Исследование конструктивно-технологических параметров дождевателей «КАСКАД» / Е.В. Смирнов [и др.] // Инновационные перспективы современной науки. Естественные науки. Астрахань, 2018. С. 16–19.
13. Экологическая и экономическая оптимизация эксплуатационного режима орошения современными дождевальными машинами / В.Ф. Василенков [и др.] // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2015. № 4. С. 85–92.
14. Гаврилица О. А. Эрозионная деградация черноземов при поливе дождеванием и пути ее предупреждения: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Кишинев, 1991. 48 с.
15. Гаврилица О. А. Эрозионные процессы при поливе дождеванием и пути их минимизации // Почвоведение. 1993. № 3. С. 77–84.
16. Гостищев Д.П., Гильденберг Е.Ю. Меры по борьбе с эрозией почв при поливе сельскохозяйственных культур дождеванием // Проблемы устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования. 2007. № 2. С. 136–142.
17. Антипов А.О. Совершенствование технологического процесса и систем торможения дождевальной машины «Фрегат» на пневматических шинах для полива многолетних трав в условиях склоновых земель: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2015. 172 с.
18. Городничев В. И. Современные средства контроля для оценки качества работы поливной техники // Проблема устойчивого развития мелиорации и рационального природопользования. Матер. юбилейной межд. науч.-практ. конф. М., 2007. С. 122–130.
19. Многоопорные дождевальные машины / С.Х. Гусейн-Заде [и др.]. М., 1984. 191 с.
20. Малько И.В. Технология и дождевальная машина «Фрегат» с усовершенствованными ходовыми системами для полива площадей с пересеченным рельефом: дис. ... канд. техн. наук. Рязань, 2006. 161 с.
21. Ольгаренко Г.В. Нормирование, информационное обеспечение и реализация водосберегающих процессов орошения: дис. ... д-ра с-х. наук. Новочеркасск, 1998. 409 с.
22. Рыжко Н. Ф. Ресурсосберегающие технологии и технические средства полива многоопорными дождевальными машинами в условиях Саратовского Заволжья: дис. ... д-ра. техн. наук. Саратов, 2010 – 366 с.
23. Рязанцев А.И. Механико-технологическое обоснование, создание и внедрение многоопорных дождевальных машин с поливом в движении по кругу для сложных почвенно-рельефных условий: дис. ... д-ра техн. наук. Рязань, 1994. 253 с.
24. Снопич Ю.Ф. Интенсификация технологий и совершенствование технических средств орошения дождеванием: дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 2011. 253 с.
25. Фокин Б. П., Носов А. К. Современные проблемы применения многоопорных дождевальных машин. Ставрополь, 2011. 80 с.
26. Darko R. O., Yuan S. Q., Liu J. P., Yan H. F., Zhu X. Y. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation // Int J Agric & Biol Eng. 2017; 10(2): 1–15.
27. Faria L.C., Nörenberg B.G., Colombo A., Dukes M.D., Timm L.C., Beskow S., Caldeira T.L. Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system // Irrig. Sci. 2019, 37, 195–206.
28. Jiao Jian, Yadong Wang, Liliang Han, Derong Su. Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems // Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University. Published: 21 April, 2017 – P. 1–17.
29. Liu J. P., Liu X. F., Zhu X. Y., Yuan S. Q. Droplet characterisation of a complete fluidic sprinkler with different nozzle dimensions // Biosyst Eng, 2016; 148(6): 90–100.
30. Есин А.И., Журавлева Л.А., Соловьев В.А. Ресурсосберегающие технологии и дождевальные машины кругового действия. Саратов, 2019. 214 с.
31. Лебедев Б.М. Дождевальные машины. М., 1965. 225 с.
32. Рекомендации по научно обоснованным технологиям орошения сельскохозяйственных культур кукурузы на зерно, картофеля, лука и моркови современными стационарными широкозахватными круговыми и фронтальными дождевальными машинами Reinke и Valley в условиях центральной орошаемой зоны Ростовской области / под ред. Н.А. Иванова; Новочерк. гос. мелиор. акад. Новочеркасск, 2013. 30 с.
33. Фокин Б. П. Повышение эффективности полива многоопорными дождевальными машинами: дис. ... д-ра техн. наук. Ставрополь, 2002. 313 с.

REFERENCES

1. Baranova E. V. Humus regime of dark chestnut soils of different economic use in the conditions of Western Kazakhstan: abstract. St. Petersburg.-Pushkin, 2012. 22 p. (In Russ.).
2. Orujeva N. I. The role of perennial agrocenoses in preserving the fertility of irrigated soils. *Soil science in Russia: challenges of modernity, the main directions of development*. Moscow, 2012: 364–367. (In Russ.).
3. Prikhodko V. E. Irrigated steppe soils: functioning, ecology, productivity. Moscow, 1996. 180 p. (In Russ.).
4. Shchedrin V. N., Vasiliev S. M. Theory and practice of alternative types of irrigation of chernozems of the south of the European territory of Russia. Novocherkassk, 2011. 435 p. (In Russ.).
5. Shchedrin V.N., Dokuchaeva L.M., Yurkova R.E. Negative soil processes during regular irrigation of various types of soils. *Scientific Journal of the Russian Research Institute of Problems of Melioration*. 2018; 2: 1–21. (In Russ.).
6. Prikhodko V.E. Irrigated Steppe Soils: Functioning, Ecology, Productivity. Moscow, 1996. 180 p. (In Russ.).
7. Zaporozhichenko E.V. Changes in soil-reclamation and hydro-geological conditions of the North Caucasus under the influence of reclamation and irrigation. *Reclamation and irrigation of soils in the plains of the Caucasus*. Moscow, 1986: 69–72. (In Russ.).
8. Pronko N. A., Romanova A. G. Methods of restoring soil fertility during irrigation. *Soil Fertility*. 2005; 4(25): 31–32. (In Russ.).
9. Romanova L. G. The effect of long-term irrigation on the properties of dark chestnut soils of the Volga region and agro-reclamation techniques for their improvement. Saratov, 2002. 23 p. (In Russ.).
10. Akhtyrsev B. P., Lepilin I. A. The influence of irrigation on the properties of typical chernozems of the southeast of the Central Chernozem region. *Biological Sciences*. 1979; 4: 87–92. (In Russ.).
11. The influence of irrigation on the properties of chernozems of the North Caucasus / A. T. Liskonov et al. *Melioration and water management*. Moscow, 1990: 50. (In Russ.).
12. Investigation of structural and technological parameters of CASCADE sprinklers / E.V. Smirnov et al. *Innovative perspectives of modern science. Natural sciences*. Astrakhan, 2018: 16–19. (In Russ.).
13. Ecological and economic optimization of the operational mode of irrigation with modern sprinkler machines / V.F. Vasilenkov et

al. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2015; 4: 85–92. (In Russ.).

14. Gavrilitsa O. A. Erosive degradation of chernozems during irrigation by sprinkling and ways to prevent it. Chisinau, 1991. 48 p. (In Russ.).

15. Gavrilitsa O. A. Erosive processes during irrigation by sprinkling and ways to minimize them. *Soil science*. 1993; 3: 77–84. (In Russ.).

16. Gostischev D.P., Gildenberg E.Yu. Measures to combat soil erosion when watering crops by sprinkling. *Problems of sustainable development of land reclamation and rational nature management*. 2007; 2: 136–142. (In Russ.).

17. Antipov A.O. Improvement of the technological process and braking systems of the sprinkler machine “Frigate” on pneumatic tires for watering perennial grasses in conditions of sloping lands. Ryazan, 2015. 172 p. (In Russ.).

18. Gorodnichev V. I. Modern means of control for assessing the quality of irrigation equipment. *The problem of sustainable development of land reclamation and rational nature management*. Moscow, 2007: 122–130. (In Russ.).

19. Multi-support sprinkler machines / S.H. Huseyn-Zadeh et al. Moscow, 1984. 191 p. (In Russ.).

20. Malko I.V. Technology and sprinkler machine “Frigate” with advanced running systems for watering areas with rough terrain. Ryazan, 2006. 161p. (In Russ.).

21. Olgarenko G.V. Rationing, information support and implementation of water-saving irrigation processes. Novocherkassk, 1998. 409 p. (In Russ.).

22. Ryzhko N. F. Resource-saving technologies and technical means of irrigation with multi-support sprinklers in the conditions of the Saratov Volga region. Saratov, 2010. 366 p. (In Russ.).

23. Ryazantsev A.I. Mechanical and technological justification, creation and implementation of multi-support sprinkler machines with irrigation in motion in a circle for difficult soil-relief conditions. Ryazan, 1994. 253 p. (In Russ.).

24. Snipich Yu.F. Intensification of technologies and improvement of technical means of irrigation by sprinkling. Saratov, 2011. 253 p. (In Russ.).

25. Fokin B. P., Nosov A. K. Modern problems of application of multi-support sprinkler. Stavropol, 2011. 80 p. (In Russ.).

26. Darko R. O., Yuan S. Q., Liu J. P., Yan H. F., Zhu X. Y. Overview of advances in improving uniformity and water use efficiency of sprinkler irrigation. *Int J Agric & Biol Eng*. 2017; 10(2): 1–15.

27. Faria L.C., Nörenberg B.G., Colombo A., Dukes M.D., Timm L.C., Beskow S., Caldeira T.L. Irrigation distribution uniformity analysis on a lateral-move irrigation system. *Irrig. Sci*. 2019; 37: 195–206.

28. Jiao Jian, Yadong Wang, Liliang Han, Derong Su. Comparison of Water Distribution Characteristics for Two Kinds of Sprinklers Used for Center Pivot Irrigation Systems. *Research Center for Grassland Resources and Ecology, Beijing Forestry University*. Published: 21 April, 2017: 1–17.

29. Liu J. P., Liu X. F., Zhu X. Y., Yuan S. Q. Droplet characterisation of a complete fluidic sprinkler with different nozzle dimensions. *Biosyst Eng*. 2016; 148(6): 90–100.

30. Yesin A.I., Zhuravleva L.A., Soloviev V.A. Resource-saving technologies and circular sprinkler machines. Saratov, 2019. 214 p. (In Russ.).

31. Lebedev B.M. Sprinkler machines. Moscow, 1965. 225 p. (In Russ.).

32. Recommendations on scientifically based technologies for irrigation of agricultural crops of corn for grain, potatoes, onions, and carrots with modern stationary wide-reach circular and frontal sprinkler machines Reinke and Valley in the conditions of the central irrigated zone of the Rostov region / ed. by N.A. Ivanov. Novocherkassk, 2013. 30 p. (In Russ.).

33. Fokin B. P. Improving the efficiency of irrigation with multi-support rain machines. Stavropol, 2002. 313 p. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 26.02.2022; одобрена после рецензирования 12.03.2022; принята к публикации 22.03.2022.

The article was submitted 26.02.2022; approved after reviewing 12.03.2022; accepted for publication 22.03.2022.

