

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 631.371

DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-66-71

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИАМЕТРА ТРУБОПРОВОДА ДОЖДЕВАЛЬНОЙ МАШИНЫ КРУГОВОГО ДЕЙСТВИЯ ПО КРИТЕРИЮ МИНИМУМА ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ*ЦУГЛЕНОК НИКОЛАЙ ВАСИЛЬЕВИЧ*, член-корр. РАСХН, д-р техн. наук, профессор

ntsuglenok@mail.ru

БАКИРОВ СЕРГЕЙ МУДАРИСОВИЧ✉, канд. техн. наук, доцентs.m.bakirov@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>*ЛОГАЧЁВА ОКСАНА ВЛАДИМИРОВНА*, канд. техн. наук, доцент

sgauoksana@mail.ru

Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова; 410012, Российская Федерация, г. Саратов, Театральная пл., 1

Аннотация. В Центральной части РФ доказано эффективное использование современных электрифицированных дождевальных машин кругового действия. Их конструкции выбирают в зависимости от агротехнических требований к поливу, в том числе изменения диаметра водораспределительного трубопровода. Однако при изменении диаметра трубопровода изменяется нагрузка на электропривод опорных тележек дождевальных машин, что приводит к соответствующему изменению энергопотребления. В свою очередь это также изменяет нагрузку насоса водоподачи. В работе ставится задача определения оптимального изменения диаметра трубопроводом по критерию минимума энергопотребления с учетом ряда допущений. Рассмотрена зависимость изменения нагрузки на электропривод опорной тележки от изменения диаметра трубопровода одной секции. Установлено, что уменьшение диаметра на 27% (например, переход диаметра с 219 на 159 мм) приводит к уменьшению нагрузки на электропривод на 38%. Однако это также приводит к увеличению потерь напора, создаваемого электродвигателем насоса, соответственно к увеличению нагрузки и энергопотреблению на 0,8...3,8%. На первый взгляд, эффект очевиден, однако мощность электродвигателя насоса водоподачи в 10...25 раз больше мощности электродвигателя опорной тележки. На основе коэффициентов подобия составляющих полива (водоподачи и водораспределения) получена зависимость общего энергопотребления от изменения диаметра водораспределительного трубопровода. Дифференцированием полученной функции получена зависимость величины оптимального диаметра для конкретных условий эксплуатации. Построены графики зависимостей энергопотребления от изменения диаметра с учетом некоторых ограничений: подачи насоса, статического напора, количества секций дождевальной машины.

Ключевые слова: энергопотребление, дождевальная машина, электропривод, электродвигатель насоса, мощность электропривода.

Формат цитирования: Цугленок Н.В., Бакиров С.М., Логачёва О.В. Оптимизация диаметра трубопровода дождевальной машины кругового действия по критерию минимума энергопотребления // Агроинженерия. 2021. № 4(104). С. 66-71. DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-66-71.

© Цугленок Н.В., Бакиров С.М., Логачёва О.В., 2021



ORIGINAL PAPER

OPTIMIZING THE PIPELINE DIAMETER OF A CIRCULAR SPRINKLER ACCORDING TO THE MINIMUM ENERGY CONSUMPTION CRITERION*NIKOLAY V. TSUGLENOK*, Corresponding Member of RAAS, DSc (Eng), Professor

ntsuglenok@mail.ru

SERGEY M. BAKIROV✉, PhD (Eng), Associate Professors.m.bakirov@mail.ru✉; <https://orcid.org/0000-0002-9392-7627>*OXSANA V. LOGACHEVA*, PhD (Eng), Associate Professor

sgauoksana@mail.ru

Saratov State Agrarian University named after N.I. Vavilov; 1, Teatralnaya Sq., Saratov, 410012, Russian Federation

Abstract. The authors have determined the conditions for the effective use of modern electrified circular sprinklers in the central part of Russia. Their designs are chosen depending on the agrotechnical requirements for irrigation, including the change in the diameter of the water distribution pipeline. However, when the diameter of the pipeline changes, the load on the electric drive of the support trolleys of the sprinkler changes too, which leads to a corresponding change in energy consumption. In turn, this also

changes the load of the water supply pump. The paper sets the task of determining the optimal change in the diameter of pipelines according to the criterion of minimum energy consumption, taking into account a number of assumptions. The authors have analyzed the relationship between the change in the load on the electric drive of the sprinkler support trolley and the change in the diameter of one sprinkler section pipeline. It has been found that a decrease in the diameter by 27% (for example, the transition of the diameter of 219 mm to the diameter of 159 mm) leads to a decrease in the load on the electric drive by 38%. However, this also leads to an increase in the head loss in the water supply pump motor and, respectively, to an increase in the load and energy consumption by 0.8...3.8%. The effect is initially obvious, but the power of the electric motor of the water supply pump is 10...25 times higher than that of the electric motor of the sprinkler support trolley. Based on the similarity coefficients of the irrigation components (water supply and water distribution), the relationship between the total energy consumption and the change in the diameter of the water distribution pipeline has been obtained. By differentiating the obtained function, the dependence of the value of the optimal diameter for specific operating conditions is also obtained. Graphs of the relationship between energy consumption and the change in diameter have been determined, taking into account some restrictions: pump supply, static pressure, and the number of the sprinkler sections.

Key words: energy consumption, sprinkler, electric drive, pump motor, electric drive power.

For citation: Tsuglenok N.V., Bakirov S.M., Logacheva O.V. Optimizing the pipeline diameter of a circular sprinkler according to the minimum energy consumption criterion. *Agricultural Engineering*, 2021; 4 (104): 66-71. (In Rus.). DOI: 10.26897/2687-1149-2021-4-66-71.

Введение. При эксплуатации дождевальных машин стремятся повысить качество полива. Оно зависит от многих параметров: режима работы дождевальной машины, формы и типа дождеобразующих насадок, входного давления потока поливной воды. Конструктивно воздействовать на параметры полива научились с помощью изменения диаметра водораспределительного трубопровода. Однако это способствует изменению потерь напора, и в то же время – изменению нагрузки на электропривод опорных тележек дождевальной машины. Данное конструктивное решение для машин кругового действия может существенно влиять на энергопотребление всего процесса полива.

Цель исследований: оценить, как изменится энергопотребление полива при изменении диаметра водораспределительного трубопровода; найти оптимальные значения соответствующих параметров.

Материалы и методы. Для достижения поставленной цели применены эмпирические (наблюдение, счёт, измерение) и теоретические методы научного исследования (анализ, многокритериальная оптимизация).

Результаты исследования. В структуре общего энергопотребления полива дождевальными машинами снижение диаметра способствует увеличению потерь и возрастанию нагрузки на насос водоподдачи. Определим повышение нагрузки насоса водоподдачи ввиду изменения диаметра водораспределительного трубопровода дождевальной машины кругового действия.

Мощность, потребляемая электродвигателем насоса, определяется по формуле^{1,2} [1]:

$$P_{\text{нас}} = \frac{k_3 \rho_v g Q_n H}{\eta_n \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{дв}}}, \quad (1)$$

где k_3 – коэффициент запаса по мощности, о.е.; ρ_v – плотность поливной воды, кг/м³; Q_n – подача насоса, м³/с; H – общий напор, создаваемый насосом, м; η_n – КПД насоса; $\eta_{\text{пер}}$ – КПД передачи; $\eta_{\text{дв}}$ – КПД электродвигателя.

¹ Мелиорация и водное хозяйство. Орошение: Справочник / Под ред. Б.Б. Шумакова. М.: Колос, 1999. 432 с.

² Механизация полива: Справочник / Б.Г. Штепа [и др.]. М.: Агропромиздат, 1990. 336 с.

Изменение диаметра водораспределительного трубопровода приведет к увеличению общего напора. Напор H насоса складывается из составляющих:

$$H = H_c + H_b + \Delta h, \quad (2)$$

где H_c – статистический напор, который является суммой напоров всасывания и нагнетания, м; H_b – напор на выходе трубопровода, м; Δh – потери напора, зависящие от типа трубы, длины и диаметра, м.

Обозначим детерминированные параметры:

$$A = \frac{k_3 \rho_v g Q_n}{\eta_n \eta_{\text{пер}} \eta_{\text{дв}}}. \quad (3)$$

Запишем мощность электродвигателя насоса при изменении диаметра водораспределительного трубопровода на величину Δd с учетом преобразований:

$$P'_{\text{нас}} = A \left(H_0 + \frac{\lambda_T l_T v_b^2}{2d_T g} + \frac{\lambda_{\text{ДМ1}} l_1 v_{1b}^2}{2d_1 g} + \frac{\lambda_{\text{ДМ2}} l_2 v_{2b}^2}{2d_0 g} \right), \quad (4)$$

где H_0 – сумма статистического напора и напора на выходе трубопровода, м; d_T – диаметр водоподводящего трубопровода (от водоема до ДМ), м; l_T – длина водоподводящего трубопровода, м (примем допущение, что по всей длине водоподводящего трубопровода материал трубы и ее диаметр одинаковы); λ_T , $\lambda_{\text{ДМ1}}$, $\lambda_{\text{ДМ2}}$ – коэффициенты гидравлических потерь на трение движения потока поливной воды соответственно в водоподводящем трубопроводе, водораспределительном трубопроводе ДМ с диаметром d_1 и диаметром d_0 , о.е.; l_1 , l_2 – длины водораспределительного трубопровода ДМ соответственно с диаметрами d_1 и d_0 , м; v_b , v_{1b} , v_{2b} – скорости потоков поливной воды соответственно в водоподводящем трубопроводе, водораспределительном трубопроводе ДМ с диаметром d_1 и диаметром d_0 , м/с.

Гидравлические потери на трение потока поливной воды зависят от вида течения (ламинарного или турбулентного) и рассчитываются на основе числа Рейнольдса³, и⁴ [1]. Число Рейнольдса зависит от диаметра трубопро-

³ Полив дождеванием / Под общ. ред. канд. с.-х. наук И.А. Безменова. Саратов: Приволжское книжное издательство, 1979. 175 с.

вода, скорости потока и кинематической вязкости поливной воды и для нашего случая лежит в пределах $10^5 \dots 10^6$. Критическое значение числа Рейнольдса определяется особенностями оросительной сети, материалом и шероховатостью стенок трубы и т.п. Коэффициент гидравлических потерь на трение можно определить для турбулентного течения по упрощенному выражению⁴:

$$\lambda_T = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}}, \quad (5)$$

где Re – число Рейнольдса.

Анализируя выражение (5) и данные^{3,4} [1], примем допущение, что коэффициенты гидравлических потерь в водоподводящем трубопроводе, водораспределительном трубопроводе ДМ с диаметром d_1 и диаметром d_0 будут приблизительно равными:

$$\lambda_T \approx \lambda_{DM1} \approx \lambda_{DM2} = \lambda_n. \quad (6)$$

Скорость потока поливной воды уменьшается по длине за счет действия динамических сил на объем поливной воды, однако уменьшение диаметра приводит к увеличению скорости (для одинаковой подачи насоса). Примем допущение, что скорость на всем пути движения потока поливной воды также приблизительно одинакова:

$$v_B \approx v_{1B} \approx v_{2B}. \quad (7)$$

Представим длину водораспределительного трубопровода l_{DM} как сумму длин l_1 и l_2 и запишем:

$$\left. \begin{aligned} l_{DM} &= l_1 + l_2, \\ l_1 &= a' l_{DM}, \\ l_2 &= (1 - a') l_{DM}, \\ 0 &< a' < 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Изменение диаметра с d_1 на d_0 выразим через относительный показатель снижения диаметра Δd :

$$\left. \begin{aligned} \Delta d &= \frac{d_1 - d_0}{d_1}, \\ d_0 &= d_1(1 - \Delta d), \\ 0 &< \Delta d < 0,5 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Запишем мощность, потребляемую электродвигателем насоса, с учетом допущений и выражений (8) и (9):

$$P'_{нас} = A \left(H_0 + \frac{\lambda_n l_T v_B^2}{2d_T g} + \frac{\lambda_n l_{DM} v_B^2}{2d_1 g} \left[\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right] \right). \quad (10)$$

Если сравнить для одинаковых условий эксплуатации ДМ, мощность насоса при неизменном диаметре с мощностью насоса при изменении диаметра на величину Δd , то получим изменение потребляемой мощности на величину $\Delta P_{нас}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{нас} &= \frac{P'_{нас} - P_{нас}}{P_{нас}} = \\ &= \frac{H_0 + \frac{\lambda_n l_T v_B^2}{2d_T g} + \frac{\lambda_n l_{DM} v_B^2}{2d_1 g} \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{H_0 + \frac{\lambda_n l_T v_B^2}{2d_T g} + \frac{\lambda_n l_{DM} v_B^2}{2d_1 g}} - 1. \end{aligned} \quad (11)$$

Обозначим сумму статистического напора, напора на выходе трубопровода и потерь в водоподводящем трубопроводе с помощью коэффициента b' :

$$\left. \begin{aligned} H_0 + \frac{\lambda_n l_T v_B^2}{2d_T g} &= b' \left(\frac{\lambda_n l_{DM} v_B^2}{2d_1 g} \right), \\ 1 &< b' < 20 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Тогда изменение потребляемой мощности электродвигателя насоса составит (рис. 1):

$$\Delta P_{нас} = \frac{b' + \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} - 1. \quad (13)$$

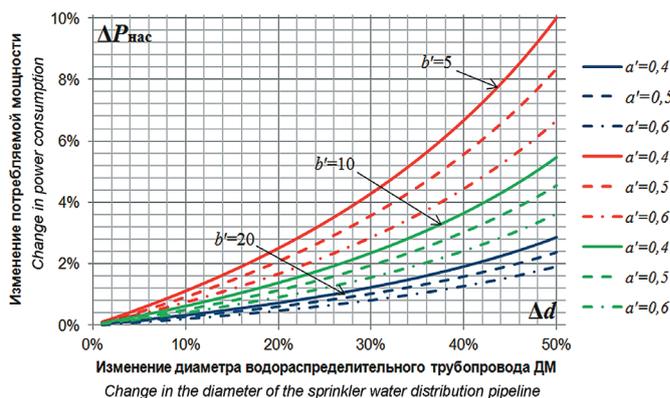


Рис. 1. Зависимость изменения потребляемой мощности электродвигателя насоса при изменении диаметра водораспределительного трубопровода ДМ

Fig. 1. Relationship between the change in the power consumption of the pump motor when the diameter of the sprinkler water distribution pipeline changes

Из рисунка следует, что при изменении⁴ (уменьшении) диаметра трубопровода дождевальной машины на величину Δd потребляемая мощность электродвигателя насоса увеличивается и зависит от коэффициента пропорциональности длин водораспределительного трубопровода a' , а также от коэффициента пропорциональности потерь напора b' . Например, если водоподводящий трубопровод имеет длину, значительно больше длины водораспределительного трубопровода, и сумма статистического напора, напора на выходе трубопровода и потерь в водоподводящем трубопроводе в 20 и более раз выше потерь напора по длине трубопровода ДМ ($b' > 20$, на рисунке 1 выделено синим цветом), половина водораспределительного трубопровода ДМ ($a' = 0,5$) будет выполнена диаметром 0,219 м, а вторая половина – диаметром 0,159 м ($\Delta d = 27\%$), то потребляемая мощность увеличится на 0,88%. Однако при тех же условиях, но при коэффициенте пропорциональности потерь напора $b' \approx 5$ (если ДМ располагается рядом с водоемом на ровном рельефе, на рисунке 1 выделено красным цветом), то потребляемая мощность электродвигателя насоса увеличится на 3,08%.

⁴ Кристенсен Р. Введение в теорию вязкоупругости. М.: Мир, 1974. 340 с.

Оценим изменение общего энергопотребления полива ΔW_{Π} при изменении диаметра водораспределительного трубопровода ДМ, применив критериальный анализ, и запишем:

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{ДМ}} \Delta W_{\text{ДМ}} + \pi_{\text{нас}} \Delta W_{\text{нас}}, \quad (14)$$

где $\Delta W_{\text{ДМ}}$ – изменение энергопотребления дождевальной машины, %; $\pi_{\text{ДМ}}$ и $\pi_{\text{нас}}$ – критерии подобия соответственно энергопотребления ДМ на водораспределение и энергопотребления насоса на водоподачу;

$$\left. \begin{aligned} \pi_{\text{ДМ}} &= \frac{W_{\text{ДМ}}}{W_{\Pi}}, \\ \pi_{\text{нас}} &= \frac{W_{\text{нас}}}{W_{\Pi}} \end{aligned} \right\}, \quad (15)$$

где W_{Π} , $W_{\text{ДМ}}$, $W_{\text{нас}}$ – энергопотребление соответственно полива (общее энергопотребление), системы энергоснабжения дождевальной машины и насоса водоподачи, кВт·ч.

Доля снижения нагрузки электропривода $\Delta P''$ опорных тележек, несущих водораспределительный трубопровод ДМ меньшего диаметра, зависит от величины Δd , начального диаметра d_1 , толщины стенки трубы, а также длины трубопровода секции [2-4]:

$$\Delta P'' = 1 - \frac{b_{\text{сг}}^2 (G - B) + b_{\text{сг}} d_1 (B - G) [1 - \Delta d] + G \frac{d_1^2}{4} (1 - \Delta d)^2 + P_{\text{во}}}{b_{\text{сг}}^2 (G - B) + b_{\text{сг}} d_1 (B - G) + G \frac{d_1^2}{4} + P_{\text{во}}}, \quad (16)$$

где B и G – постоянные, зависящие от плотности стали и поливной воды, ускорения свободного падения и длины трубопровода ($l_{\text{ДМ}} = 595$ м), $B = 165,4$ МН/м²; $G = 20,0$ МН/м²; $b_{\text{сг}}$ – толщина стенки трубопровода, м; $P_{\text{во}}$ – вес опорных тележек секций, Н.

Изобразим данную зависимость (рис. 2).

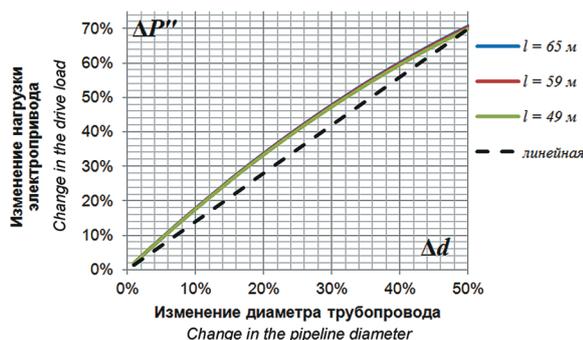


Рис. 2. Зависимость изменения нагрузки электропривода от изменения диаметра Δd водораспределительного трубопровода ДМ начальным диаметром $d_1 = 219$ мм

Fig. 2. Relationship between the change in the load of the electric drive and the change in diameter Δd of the sprinkler water distribution pipeline with an initial diameter $d_1 = 219$ mm

Из рисунка 2 следует, что данная зависимость имеет линейный характер на малом промежутке изменения диаметра (пунктирная линия). На изменение нагрузки электропривода для опорной тележки одной секции незначительно влияет длина секции, а также начальный диаметр d_1 .

Энергопотребление электродвигателя насоса водоподачи определяется потребляемой мощностью насоса и временем его работы. Изменение диаметра приводит к увеличению продолжительности работы, так как ДМ должно выполнить условие поливной нормы. Однако, если исходить из практических наблюдений [5-8], продолжительность работы насоса изменится незначительно, поэтому примем продолжительность работы одинаковой для сравниваемых вариантов. Тогда (13) запишем для изменения энергопотребления:

$$\Delta W_{\text{нас}} = \frac{b' + \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} - 1. \quad (17)$$

Подставим в (14) выражения (17) и аналогичное – с энергопотреблением ДМ преобразованное выражение (16) [3]:

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{нас}} \left[1 - \frac{b' + \left(\frac{a'(1 - \Delta d) + (1 - a')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} \right] + \pi_{\text{ДМ}} \left[1 - \frac{\left[un \left(\frac{1 + un}{2} \right) + n(1 - u)(1 - \Delta P'') \left(\frac{un + 1 + n}{2} \right) \right]}{n \left[\frac{1 + n}{2} \right]} \right], \quad (18)$$

где u – коэффициент, характеризующий отношение количества секций с большим диаметром к общему числу секций; n – количество секций ДМ.

Анализируя полученное выражение, коэффициенты u и a' характеризуют отношение длины (количество секций) с большим диаметром d_1 к общей длине (общему числу секций n) водораспределительного трубопровода ДМ. Примем условие, что изменение диаметра выполняется посекционно, то есть в месте перехода опорных тележек, и обозначим эти коэффициенты:

$$u = a' = a''. \quad (19)$$

Для дальнейшего исследования выражения (18) примем допущение, что изменение нагрузки электропривода линейно зависит от изменения диаметра трубопровода секции. Тогда с учетом преобразований выражение (18) примет вид:

$$\Delta W_{\Pi} = \pi_{\text{нас}} \left[1 - \frac{b' + \left(\frac{a''(1 - \Delta d) + (1 - a'')}{1 - \Delta d} \right)}{b' + 1} \right] + \pi_{\text{ДМ}} \left[1 - \frac{\left[a'' \left(\frac{1 + a''n}{2} \right) + (1 - a'')(1 - 1,4\Delta d) \left(\frac{a''n + 1 + n}{2} \right) \right]}{\left[\frac{1 + n}{2} \right]} \right]. \quad (20)$$

Приняв ряд ограничений по напору, подаче насоса, зависимости изменения нагрузки электропривода, определим оптимальное значение доли снижения диаметра водораспределительного трубопровода $\Delta d_{\text{опт}}$. Для этого продифференцируем по d Δd выражение (20) и получим:

$$\Delta d_{\text{опт}} = 1 - \sqrt{\frac{\pi_{\text{нас}} a'' \left(\frac{1 + n}{2} \right)}{1,4\pi_{\text{ДМ}} (1 - a'') \left(\frac{a''n + n + 1}{2} \right) (b' + 1)}}. \quad (21)$$

Тогда доля изменения (снижения) общего энергопотребления полива примет вид, представленный на рисунке 3.

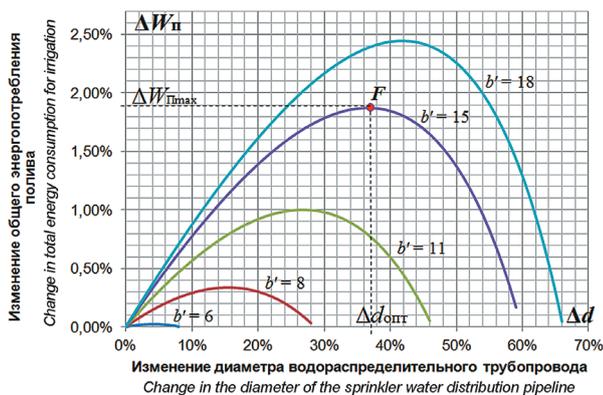


Рис. 3. Зависимость изменения доли энергопотребления полива дождевальными машинами кругового действия при изменении диаметра водораспределительного трубопровода при условии: $n = 10; a'' = 0,5; \pi_{нас} = 0,9; \pi_{ДМ} = 0,1$

Fig. 3. Relationship between the change in the share of energy consumption when using circular sprinklers for irrigation and the change in the diameter of the water distribution pipeline under the condition: $n = 10; a'' = 0,5; \pi_{pump} = 0,9; \pi_{SM} = 0,1$

Энергопотребление полива складывается из слагаемых энергопотреблений насоса водоподачи и системой энергоснабжения ДМ на распределение. При изменении (уменьшении) диаметра водораспределительного трубопровода на величину Δd , начиная с середины ($a'' = 0,5$) для дождевальной машины, состоящей из 10 секций ($n = 10$), увеличивается нагрузка на электродвигатель

насоса водоподачи, но в то же время снижается нагрузка на электропривод опорных тележек. Если же дождевальная машина располагается на значительном расстоянии от водоема (насоса водоподачи) так, что при той же подаче насоса сумма статического напора и потерь на трение водоподводящего трубопровода будет в 15 и более раз больше потерь на трение водораспределительного трубопровода ДМ ($b' = 15$, фиолетовая линия рисунка 3), то при снижении диаметра до оптимального значения ($\Delta d_{опт} = 37\%$) находим точку F на рисунке 3, которая соответствует максимальному снижению общего энергопотребления полива на 1,9% в том случае, когда энергопотребление насоса водоподачи от общего энергопотребления составляет 90% ($\pi_{нас} = 0,9$).

Если же дождевальная машина, имея те же характеристики, располагается вблизи водоема (насоса водоподачи) так, что при той же подаче насоса сумма статического напора и потерь на трение водоподводящего трубопровода будет в 6 раз больше потерь на трение водораспределительного трубопровода ДМ ($b' = 6$, синяя линия рисунка 3), то при снижении диаметра на 5...10% общее энергопотребление в целом не изменится.

Выводы

При значительном расстоянии дождевальной машины от насоса водоподачи или перепаде рельефа на местности ($b' > 11$) снижения общего энергопотребления полива на 1,0...2,5% можно добиться снижением диаметра водораспределительного трубопровода ДМ. Это конструктивное решение в целом позволит повысить энергетическую эффективность полива дождевальных машин, эксплуатируемых в тяжелых условиях (высокой долей энергопотребления электроприводов, значительной удаленностью от насоса водоподачи, высоким перепадом рельефа).

Библиографический список

1. Рыжко Н.Ф., Рыжко Н.В., Рыжко С.Н. и др. Регулирование расхода воды дождевальных машин для снижения потребления электроэнергии на полив // Инновации природообустройства и защиты окружающей среды: Материалы I Национальной научно-практической конференции с международным участием. Саратов, 2019. С. 105-109.
2. Ерошенко Г.П., Соловьев Д.А., Бакиров С.М. Снижение мощности электропривода секции дождевальной машины за счет изменения диаметра водораспределительного трубопровода // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. 2019. № 2 (55). С. 178-184. DOI: 10.24411/2078-1318-2019-12178.
3. Eroshenko G.P., Esin A.I., Solovyev D.A. et al. Optimal power supply synthesis for circular action sprinkler // Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems. 2018. Vol. 10. No. 10 Special Issue. P. 2129-2134.
4. Есин А.И. Ресурсосберегающие технологии и дождевальные машины кругового действия: Монография / А.И. Есин, Л.А. Журавлева, В.А. Соловьев. Саратов: КУБиК, 2019. 214 с.
5. Бакиров С.М. Перспективы развития дождевальной техники // Аграрный научный журнал. 2020. № 1. С. 50-55. DOI: 10.28983/asj.y2020i1pp50-55.

References

1. Ryzhko N.F., Ryzhko N.V., Ryzhko S.N. et al. Regulirovanie raskhoda vody dozhdeval'nykh mashin dlya snizheniya potrebleniya elektroenergii na poliv [Regulation of water consumption of sprinklers to reduce electricity consumption for irrigation]. *Innovatsii prirodobustroystva i zashchity okruzhayushchey sredy: Materialy I Natsional'noy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem*. Saratov, 2019: 105-109. (In Rus.)
2. Eroshenko G.P., Soloviev D.A., Bakirov S.M. Snizhenie moshchnosti elektroprivoda sektsii dozhdeval'noy mashiny za schet izmeneniya diametra vodoraspredelitel'nogo truboprovoda [Reducing the power of the electric drive of a sprinkler section by changing the diameter of the water distribution pipeline]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2019; 2 (55): 178-184. DOI: 10.24411 / 2078-1318-2019-12178.3. (In Rus.)
3. Eroshenko G.P., Esin A.I., Solovyev D.A. et al. Optimal power supply synthesis for circular action sprinkler. *Journal of Advanced Research in Dynamical and Control Systems*, 2018; 10(10) Special Issue: 2129-2134.
4. Esin A.I., Zhuravleva L.A., Solovyov V.A. Resursosberegayushchie tekhnologi i dozhdeval'nye mashiny krugovogo deystviya: Monografiya [Resource-saving technologists

6. Соловьев Д.А., Камышова Г.Н., Терехова Н.Н. и др. Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин // Аграрный научный журнал. 2020. № 7. С. 81-84. DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp78-84.

7. Есин А.И., Соловьев Д.А., Бакиров С.М. Обоснование применения бустерного насоса с электроприводом крайней секции дождевальной машины // Аграрный научный журнал. 2020. № 4. С. 83-87. DOI: 10.28983/asj.y2020i4pp83-87.

8. Алтухов И.В., Цугленок Н.В. Моделирование технологических параметров инфракрасной сушки корнеклубнеплодов // Сушка, хранение и переработка продукции растениеводства: Сборник научных трудов Международного научно-технического семинара, посвящённого 175-летию со дня рождения К.А. Тимирязева. 2018. С. 114-120.

and circular sprinkler machines: Monograph]. Saratov: KUBiK, 2019: 214. (In Rus.)

5. Bakirov S.M. Perspektivy razvitiya dozhdeval'noy tekhniki [Prospects for the development of sprinkling technology]. *Agrarniy nauchniy zhurnal*, 2020; 1: 50-55. DOI: 10.28983 / asj.y2020i1pp50-55. (In Rus.)

6. Soloviev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N. Modelirovanie neyroupravleniya skorost'yu dozhdeval'nykh mashin [Simulation of neurocontrol of the speed of sprinklers]. *Agrarniy nauchniy zhurnal*. 2020; 7: 81-84. DOI: 10.28983 / asj.y2020i7pp78-84. (In Rus.)

7. Esin A.I., Soloviev D.A., Bakirov S.M. Obosnovanie primeneniya busternogo nasosa s elektroprivodom krayney seksii dozhdeval'noy mashiny [Justification of the use of a booster pump with an electric drive of the end section of a sprinkler]. *Agrarniy nauchniy zhurnal*, 2020; 4: 83-87. DOI: 10.28983 / asj.y2020i4pp83-87. (In Rus.)

8. Altukhov I.V., Tsuglenok N.V. Modelirovanie tekhnologicheskikh parametrov infrakrasnoy sushki korneklubneplovdov [Modeling of technological parameters of infrared drying of root and tuber crops]. *Sushka, khranenie i pererabotka produktsii rasteniyevodstva: Sbornik nauchnykh trudov Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminara, posvyashchonnogo 175-letiyu so dnya rozhdeniya K.A. Timiryazeva*, 2018: 114-120. (In Rus.)

Критерии авторства

Цугленок Н.В., Бакиров С.М., Логачёва О.В. выполнили теоретические исследования, на основании полученных результатов провели обобщение и подготовили рукопись. Цугленок Н.В., Бакиров С.М., Логачёва О.В. имеют на статью авторские права и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 23.03.2021

Одобрена после рецензирования 15.06.2021

Принята к публикации 15.06.2021

Contribution

N.V. Tsuglenok, S.M. Bakirov, O.V. Logacheva performed theoretical studies, and based on the results obtained, generalized the results and wrote a manuscript. N.V. Tsuglenok, S.M. Bakirov, O.V. Logacheva have equal author's rights and bear equal responsibility for plagiarism.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this paper.

The paper was received 23.03.2021

Approved after reviewing 15.06.2021

Accepted for publication 15.06.2021