Проходимость широкозахватных дождевальных машин кругового действия по увлажненным почвам

Лариса Анатольевна Журавлева, Ван Тхуан Нгуен

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева, г. Москва, Россия
nguyenthuan230593@gmail.com

Аннотация. Эффективность и рациональная технология полива широкозахватными дождевальными машинами во многом зависит от их проходимости. Надежность их работы значительно снижается при увеличении норм полива, как правило, за счет снижения их проходимости и вынужденных простоев. На практике доказано, что движение дождевальных машин при значительных нормах полива и низкой несущей способности почвы не только затрудняется, но часто исключается совсем. В статье обоснованы основные параметры проходимости, представлен обобщенный критерий проходимости широкозахватных дождевальных машин. Показана взаимосвязь сил сцепления и сопротивления движению с нормой полива.

Ключевые слова: проходимость; сцепление; сопротивление движению; дождевальная машина.

Для цитирования: Журавлева Л. А., Нгуен В. Т. Проходимость широкозахватных дождевальных машин кругового действия по увлажненным почвам // Аграрный научный журнал. 2021. № 12. С. 115–119. <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp115-119>.

AGRICULTURAL ENGINEERING

Original article

The passage of wide-grip sprinkler machines of circular action on wet soils

Larisa A. Zhuravleva, Van Th. Nguyen

Russian State Agrarian University – MSHA named after K.A. Timiryazev, Moscow, Russia
nguyenthuan230593@gmail.com

Abstract. The efficiency and rational technology of irrigation with wide-coverage sprinklers greatly depends on their passage. As a rule, the reliability of their work is significantly reduced with an increase in irrigation rates and a decrease in their permeability and forced downtime. It's common practice, that the movement of sprinklers with significant irrigation rates and low soil bearing capacity is not only hampered, but often completely excluded. The article substantiates the main parameters of cross-country ability, presents a generalized criterion of cross-country ability of wide-grip sprinkler machines. It also shows the relationship between the forces of adhesion and resistance to movement with the irrigation rate.

Keywords: cross-country ability, grip, resistance to movement, sprinkler machine.

For citation: Zhuravleva L. A., Nguyen V. Th. The passage of wide-grip sprinkler machines of circular action on wet soils. Agrarnyy nauchnyy zhurnal = Agrarian Scientific Journal. 2021;(12): 115–119(In Russ.). <http://dx.doi.org/10.28983/asj.y2021i12pp115-119>.

Введение. Особенностью работы широкозахватных дождевальных машин (ДМ) является то, что опорной поверхностью при движении являются увлажненные, а при значительных нормах полива переувлажненные почвы. В то время как сами колесные ходовые системы мало приспособлены к передвижению по переувлажненным почвам, водонасыщенным, слабонесущим грунтам.

Теория движения колесных машин по деформируемым опорным поверхностям на сегодняшний день разработана достаточно хорошо как зарубежными, так и отечественными исследователями [3, 6–10]. Однако вопросы передвижения широкозахватных дождевальных машин с колесными движителями по увлажненным и переувлажненным почвам освещены недостаточно. Специфические условия работы требуют уточнения ряда положений, особенно в области взаимодействия колесного движителя с увлажненной почвой в зависимости от типа и механических характеристик почв и нормы полива. Поэтому проблема повышения проходимости дождевальных машин весьма актуальна.

Целью является определение обобщенного критерия проходимости дождевальных машин кругового действия по увлажненным почвам.

Возможность движения тележки ДМ определяется условием [1, 5]:

$$(\mu - f)n_k \geq i, \quad (1)$$

где μ – коэффициент сцепления; f – коэффициент сопротивления качению; n_k – число колес на тележке ДМ; i – величина уклона.

Возможность движения самой ДМ определяется следующим образом:

$$(\mu - f)n_k n_t \quad (2)$$

Число тележек n_t определяется следующим образом:

$$n_t = L_m / l_{np}, \quad (3)$$

где L_m – длина машины, м; l_{np} – длина пролета, м.

Рис. 1. Схема качения колесных систем ДМ

С учетом выражения (3) выражение (2) имеет вид

$$(\mu - f)n_k(L_n/l_{np}). \quad (4)$$

Допустим, при длине машины 300 м и пролете 48,7 м соотношение составляет 6,1, для пролета 65,25 м – 4,59.

Для пролета 48,7 м:

$$(\mu - f) \cdot 6,1. \quad (5)$$

Для пролета 65,25 м:

$$(\mu - f) \cdot 4,6, \quad (6)$$

т.е. при увеличении пролета проходимость уменьшается на 25 %.

При качении колеса по сминаемой почве передаваемый крутящий момент $M_{кп}$ определяется зависимостью, рис. 1 [5]:

$$M_{кп} = \tau_{ср} k'_\tau. \quad (7)$$

А наибольшая сила сцепления $P_{сц}$ ведущего колеса с почвой [5]:

$$P_{сц} r_k = \tau_{ср} k'_\tau, \quad (8)$$

где r_k – радиус колеса; $\tau_{ср}$ – удельное сопротивление срезу почвозацепами колеса; k'_τ – момент сопротивления (статический момент поверхности среза).

Из равенства (7) можно определить максимальную силу сцепления:

$$P_{сц} = \tau_{ср} k'_\tau / r_k \quad (9)$$

Удельное сопротивление срезу имеет следующий вид [5]:

$$\tau_{ср} = P \tan \varphi + C_2, \quad (10)$$

где P – удельное давление колеса на почву; φ – угол внутреннего трения; C_2 – сцепление почвы.

Согласно исследованиям А.И. Рязанцева, в условиях испытания почв на вращательный срез с помощью крыльчатых наконечников собственным весом почвы в пределах глубины погружения можно пренебречь. Т.е. удельное сопротивление вращательному срезу, определяемому также выражением (6) с достаточной точностью, может быть отождествлено со сцеплением почвы, которое определяется по вращательному моменту и константе крыльчатого наконечника k_τ [5].

$$C_2 = M_{\max} / k_\tau. \quad (11)$$

При погружении конического наконечника теоретически доказано наличие пропорциональности между сцеплением грунта и величиной удельного сопротивления пенетрации [5]:

$$R_n = P / h_n^2, \quad (12)$$

$$C_2 = k_\varphi R_n, \quad (13)$$

где k_φ – функция пропорциональности, зависящая от угла при вершине конического наконечника и угла внутреннего трения.

Срез почвы при движении колеса происходит ее боковыми кромками и затылочной частью почвозацепов. Статический момент поверхности среза определяется следующим выражением [2]:

$$k'_\tau = \frac{\sqrt{D_k H} (D_{к1}^2 - D_k^2) D_{к1} - D_k}{D_k} \frac{2}{3} + b_n. \quad (14)$$

где D_k – диаметр колеса; H – глубина колеи; $D_{к1}$ – диаметр окружности по вершинам почвозацепов; b_n – ширина почвозацепа.

Как видно из формулы, площадь поверхности среза зависит от глубины колеи и размеров почвозацепов.

Применительно к ходовой системе тележек ДМ, когда заднее колесо движется по следу переднего, $P_{сц}$ определяется следующей зависимостью [2]:

$$P_{сц} = \frac{\sqrt{D_k}}{3 D_k^2} (\tau_{ср1} \sqrt{H_1} + \tau_{ср2} \sqrt{H_2}) ((D_{к1}^2 - D_k^2) ((D_{к1} - D_k) + 3 b_n)), \quad (15)$$

где $\tau_{ср1}$, $\tau_{ср2}$ – соответственно удельные сопротивления почвы срезу до и после прохода переднего колеса; H_1 , H_2 – соответственно глубина колеи после прохода переднего и заднего колеса.

С целью уменьшения нагрузки, приходящейся на ось колес, может быть установлена трехколесная ходовая система. В этой системе три колеса располагаются друг за другом – тандемная схема расстановки [2].

Сила сцепления данной ходовой системы определяется следующей формулой [2]:

$$P_{\text{сц}} = \frac{\sqrt{D_k}}{3D_k^2} (\tau_{\text{ср1}}\sqrt{H_1} + \tau_{\text{ср2}}\sqrt{H_2} + \tau_{\text{ср3}}\sqrt{H_3}) ((D_{\text{к1}}^2 - D_k^2)((D_{\text{к1}} - D_k) + 3b_n)). \quad (16)$$

где $\tau_{\text{ср3}}$ – удельное сопротивление почвы срезу после прохода второго колеса; H_3 – глубина колеи после прохода третьего колеса.

Сопротивление качению P_f с учетом известных положений определяется по выражению для двухколесной тележки [2]:

$$P_f = 0,88 \sqrt{\frac{G_k^3}{BD_k^3} \frac{\sqrt{P_{\text{дмн1}}} + \sqrt{P_{\text{дмн2}}}}{\sqrt{P_{\text{дмн1}}P_{\text{дмн2}}}}}, \quad (17)$$

где G_k – нагрузка на колесо; B – ширина профиля колеса; $P_{\text{дмн1}}$, $P_{\text{дмн2}}$ – несущая способность почвы до и после прохода переднего колеса.

Зависимости силы сцепления и силы сопротивления движению от нормы полива для различных пролетов представлены на рис. 2.

Из полученного графика (рис. 2) видно, что сила сцепления уменьшается с увеличением нормы полива, особенно значительно при увеличенных до 65,2 м пролетах.

Рис. 2. Зависимость силы сцепления (а) и силы сопротивления качению (б) от нормы полива для: 1 – пролет 48,7 м; 2 – пролет 59,5 м; 3 – пролет 65,25 м

Сопротивление движению при увеличении нормы полива значительно возрастает, тем в большей степени, чем длиннее пролет машины.

Методика исследований. Исследования параметров сцепления пневмошин проводили на специально разработанном экспериментальном стенде согласно рекомендациям П. К. Плотникова [4], рис. 3. Величина вертикальной нагрузки, приходящейся на колесо, составляет 200 кг. Марка шины 14,9-24, 16-20, 18-24. Пригруз осуществляется строительными блоками.

Измерение производили с помощью тензометрического комплекса МІС и тензометрического звена.

Норму полива создавали стационарным дождевателем: 300, 400 и 500 м³/га.

Коэффициенты сцепления μ и сопротивления качению f определяли по методике П. К. Плотникова [4]:

$$\mu = \frac{F_{\text{сц}}}{Q} \quad (18)$$

$$f = \frac{M_{\text{кач}}}{Q} \quad (19)$$

Рис. 3. Разработанный экспериментальный стенд:
1 – вал; 2 – короб нагрузитель; 3 – электродвигатель;
4 – двуплечий рычаг; 5 – тахогенератор; 6 – измерительное колесо; 7 – первое звено измерительной тяги; 8 – динамометрический элемент; 9 – датчик перемещения

где $F_{\text{ск}}$ – сила трения скольжения, определяемая динамометрическим элементом, и преобразуется в электрический сигнал датчиком перемещения; $M_{\text{кач}}$ – момент сил трения качения; Q – нормальная реакция, равная весу измерительного колеса вместе с силой от нагрузителя.

Изменение нагрузки, приходящейся на колесо, обеспечивалось пригрузом.

Результаты исследований. Исследования показывают, что при увеличении нормы полива с 300 до 500 м³/га коэффициент сцепления снижается от 0,45 до 0,3, рис. 4, при этом коэффициент сопротивления качению имеет обратную зависимость от 0,20 до 0,27, рис. 5.

Рис. 4. Сцепление колеса с почвой для шин 14,9-24:
 $\mu = -2,5e - 0,6 \cdot M^2 + 1,25e - 3 \cdot M^2 + 0,3$

Рис. 5. Коэффициент сопротивления качению для шин 14,9-24:
 $f = -5e - 7 \cdot M^2 + 7,5e - 4 \cdot M^2 + 0,02$

Тягово-сцепные показатели ДМ

Марка ДМ	Тип колес	Норма полива, м³/га	Коэффициенты	
			Сцепления μ	Сопротивления качению f
КАСКАД	Пневмошины 14,9-24	300	0,45	0,20
		400	0,40	0,24
		500	0,30	0,27
	Пневмошины 16-20	300	0,48	0,22
		400	0,43	0,25
		500	0,33	0,28
	Пневмошины 18-24	300	0,49	0,25
		400	0,44	0,26
		500	0,34	0,29

Анализ условия движения ДМ при полученных коэффициентах сцепления и сопротивления качению показывает, что проходимость широкозахватных дождевальных машин уменьшается при увеличении нормы полива и длины пролета. Соответственно норма полива в значительной степени определяет возможность движения широкозахватной дождевальной техники, в частности по поверхности с уклоном.

При увеличении пролета для обеспечения возможности движения, особенно при значительных нормах полива необходимо устанавливать колеса с более широким профилем.

Заключение. Анализ сцепных свойств показывает, что при увеличении нормы полива с 300 до 500 м³/га коэффициент сцепления снижается от 0,45 до 0,3, при этом коэффициент сопротивления качению имеет обратную зависимость от 0,20 до 0,27.

Увеличение пролета с 48,7 м до 65,25 м уменьшает проходимость на 25–30 %. При эксплуатации машины на местности с уклоном или при значительных нормах полива необходимо устанавливать колеса с более широким профилем либо трехколесных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусейн-Заде С. Х., Перевезенцев Л. А. Многоопорные дождевальные машины. М., 1984, 191 с.
2. Журавлева Л. А., Тхуан Н. В. Факторы, влияющие на изменение сопротивления передвижению колес и глубину колеи широкозахватных дождевальных машин // Тракторы и сельхозмашины. 2020. № 6. С. 67–71.
3. Малько И. В. Улучшение тягово-сцепных свойств ходовых систем дождевальных машин кругового действия «Фрегат» // Вестник Рязанского государственного агротехнологического университета им. П.А. Костычева. 2014. № 2 (22). С. 56–59.
4. Патент РФ №2470286. Плотников П. К. Устройство для определения коэффициента сцепления пневматических колес с дорожным покрытием // Патент России № 2011132878. Публ. 20.12.2012. Бюл. № 35.
5. 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.
6. Рязанцев А. И., Кириленко Н. Я., Малько И. В., Егоров Ю. Н. Повышение тягово-сцепных свойств ходовых систем широкозахватных дождевальных машин кругового действия «Фрегат» // Вестник ФГОУ ВПО МГАУ. 2009. № 3. С. 19–22.
7. Hildebrand R, Keskinen E, Navarrete J. Vehicle vibrating on a soft compacting soil half-space: ground vibrations, terrain damage, and vehicle vibrations. *J Terramechanics* 2008; 45:121–36.
8. Hopkins MA, Johnson JB, Sullivan R. Discrete Element Modeling of a Rover Wheel in Granular Material Under the Influence of Earth, Mars, and Lunar Gravity; 2008 p. 17–17.
9. Irani R. A., Bauer R. J., Warkentin A. A dynamic terramechanic model for small lightweight vehicles with rigid wheels and grousers operating in sandy soil. *J Terramechanics* 2011; 48:307–18.
10. Kloss C., Goniva C. LIGGGHTS: A new open-source discrete element simulation software. In: 5th International conference on discrete element methods, London, UK; 2010.

REFERENCES

1. Guseyn-Zade S. Kh., Perevezentsev L. A. Multi-support sprinkler machines. Moscow; 1984. 191 p. (In Russ.).
2. Zhuravleva L. A., Thuan N. V. Factors affecting the change in wheel resistance and track depth of wide-grip sprinkler machines. *Tractors and agricultural machinery*. 2020; 6: 67–71. (In Russ.).
3. Malko I. V. Improvement of the tractive-coupling properties of the travel systems of sprinkler machines of circular action “Fregat”. *Bulletin of the Ryazan State Agrotechnological University named after P.A. Kostychev*. 2014; 2 (22): 56–59. (In Russ.).
4. Patent PF №2470286. Plotnikov P. K. Device to determine coefficient of friction between pneumatic wheels and road surface // Patent Russia № 2011132878. Publ. 20.12.2012. Bul. № 35. (In Russ.).
5. Ryazantsev A. I. Mechanical and technological substantiation, creation and implementation of multi-support sprinkler machines with irrigation in motion in a circle for difficult soil and relief conditions. Ryazan; 1994. 253 p. (In Russ.).
6. Ryazantsev A. I., Kirilenko N. Ya., Malko I. V., Egorov Yu. N. Improvement of the tractive-coupling properties of the travel systems of wide-grip sprinkler machines of circular action “Fregat”. *Bulletin of FGOU VPO MGAU*. 2019; 3: 19–22. (In Russ.).
7. Hildebrand R., Keskinen E., Navarrete J. Vehicle vibrating on a soft compacting soil half-space: ground vibrations, terrain damage, and vehicle vibrations. *J Terramechanics*. 2008; 45:121–36. (In Russ.).
8. Hopkins M. A., Johnson J. B., Sullivan R. Discrete Element Modeling of a Rover Wheel in Granular Material Under the Influence of Earth, Mars, and Lunar Gravity; 2008 p. 17–17. (In Russ.).
9. Irani R. A., Bauer R. J., Warkentin A. A dynamic terramechanic model for small lightweight vehicles with rigid wheels and grousers operating in sandy soil. *J Terramechanics* 2011; 48:307–18. (In Russ.).
10. Kloss C., Goniva C. LIGGGHTS: A new open-source discrete element simulation software. In: 5th International conference on discrete element methods, London, UK; 2010. (In Russ.).

Статья поступила в редакцию 28.06.2021; одобрена после рецензирования 12.07.2021; принята к публикации 20.07.2021.
The article was submitted 28.06.2021; approved after reviewing 12.07.2021; accepted for publication 20.07.2021.