УДК 631.372

DOI: 10.35809/2618-8279-2020-4-11

ЗАМИНАЕМОСТЬ РАСТЕНИЙ ОПОРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ШАГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ В УСЛОВИЯХ ОРОШАЕМОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

PRESSING DOWN OF PLANTS BY SUPPORTING ELEMENTS OF A WALKING MOVER IN CONDITIONS OF IRRIGATED AGRICULTURE

А.А. Гончаров, кандидат технических наук,
В.В. Чернышев, доктор технических наук,
Н.Г. Шаронов, кандидат технических наук

A.A. Goncharov, candidate of technical sciences,
V.V. Chernyshev, doctor of technical sciences,
N.G. Sharonov, candidate of technical sciences

Волгоградский государственный технический университет

Volgograd State Technical University

Обсуждаются результаты теоретических и экспериментальных исследований заминаемости растений опорными элементами (стопами) шагающих дождевальных машин. Проведены штамповые испытания и математическое моделирование контактного взаимодействия малоразмерной стопы с грунтом при помощи пакета конечно-элементного моделирования. Получены закономерности механики контакта круглой стопы со слабонесущим грунтом при простом нормальном нагружении. Показано, что наибольшие повреждения растения получают по периметру стопы. Поврежденные растения, после некоторого периода угнетенного состояния, продолжают расти. Установлено, что заминаемость растений опорными элементами шагающих машин на водонасыщенных грунтах относительно невысока, даже если при орошении используются малоразмерные стопы. Проведенные испытания показали, что на переувлажненных грунтах шагающий движитель по грунтовой проходимости превосходит колесный. Было выяснено, что значения среднего давления на грунт, рекомендованные для колесных машин высокой проходимости, могут быть для шагающих машин увеличены. Сделан вывод, что колесный движитель, из-за буксования и фрезерного эффекта, повреждает растения в гораздо большей степени. Учитывая меньшую площадь уплотнения почвы при работе шагающей установки и отсутствие сплошной колеи, которая становится одной из причин водной эрозии почвы, можно сделать вывод, что шагающий способ передвижения в орошаемом земледелии может быть эффективнее традиционных колесных и гусеничных машин. Результаты работы могут быть востребованы при проектировании опорных элементов шагающих машин и роботов, предназначенных для работы в поливном земледелии, и служить теоретической базой для их внедрения в современное аграрное производство.

The results of theoretical and experimental studies of plant jamming by supporting elements (feet) of walking sprinklers are discussed. Stamp tests and mathematical modeling of the contact interaction of a small foot with soil using a finite element modeling package have been carried out. Regularities of the mechanics of contact of a round foot with a weak-bearing soil under simple normal loading are obtained. It is shown that the greatest damage to the plant is obtained along the perimeter of the foot. Damaged plants, after a period of depression, continue to grow. It has been established that the wrinkling of plants by the supporting elements of walking machines on water-saturated soils is relatively low, even if small-sized pads are used for irrigation. The tests carried out have shown that on waterlogged soils, the walking propeller is superior to the wheeled propeller on the soil. It was found that the values of the average ground pressure recommended for wheeled vehicles with high cross-country ability can be increased for walking machines. It was concluded that the wheel drive, due to slipping and milling effect, damages plants to a much greater extent. Considering the smaller area of soil compaction during the operation of the walking installation and the absence of a continuous track, which becomes one of the causes of water erosion of the soil, it can be concluded that the walking method of movement in irrigated agriculture can be more effective than traditional wheeled and tracked vehicles. The results of the work can be in demand in the design of supporting elements of walking machines and robots intended for work in irrigated agriculture, and serve as a theoretical basis for their implementation in modern agricultural production.

Ключевые слова: орошаемое земледелие, дождевальные машины, шагающий движитель, заминаемость растений, математическое моделирование.

Keywords: irrigated agriculture, sprinklers, walking mover, stress-strain state of the soil, mathematical modeling.

Введение. В настоящее время в качестве промышленного орошения наибольшее распространение получило дождевание. На больших площадях возделывания экономически целесообразно использовать широкозахватные дождевальные машины. Самоходные тележки дождевальных машин, как правило, имеют колесный движитель. Использование колесного движителя в поливном земледелии является одной из причин процессов эрозии и уплотнения почвы, приводящей к ее деградации. Колесо в условиях водонасыщенных почвогрунтов разрушает верхний экологически ранимый почвенный слой и оставляет глубокую колею. Колея уменьшает коэффициент полезного использования земли, а также приводит к бесполезным потерям воды, которая либо скапливается в колее, затрудняя движение, либо уходит с поля по колее, как по каналу, разрушая и смывая верхний плодородный слой почвы. Шагающие движители в меньшей мере разрушают почву и обладают лучшей проходимостью [1, 6, 8, 10]. Также имеет место снижение потерь тягового усилия на сопротивление движению – для шагающих машин, в отличие от колесных и гусеничных, грунт не является препятствием для передвижения [4, 9]. Еще одно важное преимущество шагающего движителя – дискретное взаимодействие с грунтом. При движении шагающей машины образуется не колея, а следовая дорожка. Отсутствие сплошной колеи затрудняет сток воды с поля и уменьшает водную эрозию почвы.

Материалы и методы. В ВолгГТУ на факультете автоматизированных систем, транспорта и вооружений разработаны и испытаны несколько опытных образцов шагающих машин, предназначенных для работы на водонасыщенных и экологически ранимых грунтах [7]. В частности, самоходные шагающие опоры [8, 9] для широкозахватной многосекционной дождевальной машины «Кубань». Шагающие опоры были испытаны в условиях реальной эксплуатации в составе дождевальной машины кругового действия [8]. Испытания показали, что на переувлажненных почвогрунтах шагающий движитель по грунтовой проходимости превосходит колесный. Было выяснено, что значения среднего давления на грунт, рекомендованные для колесных машин высокой проходимости, могут быть для шагающих машин увеличены. По показателям экологичности шагающий движитель также превосходит колесный. Глубина следовой дорожки при испытаниях составляла всего 5-20% от глубины колеи колеса. Причем

Рисунок 1 – Пример ирригационной эрозии почвы (зоны А и В)

по колее продолжала расти поливаемая культура.

Вместе с тем, из-за громоздких лыжеобразных стоп, площадь зоны уплотнения почвы не уменьшилась, а следовая дорожка получилась не дискретной, а сплошной. Размер стопы нужно уменьшить. При этом, очевидно, возрастет заминаемость растений. В работе, с целью выработки рекомендаций по выбору типоразмеров опорных элементов шагающего движителя дождевальных машин, исследуется заминаемость растений малоразмерными стопами в условиях водонасыщенного почвогрунта.

При изучении заминаемости растений шагающим движителем проводились экспериментальные исследования – штамповые испытания, а также математическое моделирование механики контактного взаимодействия стопы с грунтом. Штамповые испытания проводились в условиях реальных объектов орошения. Штамповая установка представляет собой шток

со сменной опорной частью. Опорная часть штампа имитировала стопу шагающего движителя. В ходе экспериментов варьировались размер штампа и глубина следового отпечатка. Изменение глубины следового отпечатка достигалось путем изменения прикладываемого усилия к штампу. При испытаниях максимальная глубина следа составляла 7-10 см. После контактного взаимодействия со стопой проводился визуальный осмотр заминаемого растения, оценивались степень и характер его повреждений. Визуальное наблюдение за поврежденным растением осуществлялось в течении 2-х недель. Штамповые испытания показали, что наибольшие повреждения растения получают по периметру стопы (рисунок 2а). Причем это имело место при любой глубине следового отпечатка. Под центральной частью стопы повреждения были меньше – просто происходило заглубление растений вместе с верхним слоем почвогрунта, расположенного под штампом. Испытания

а)

б)

Рисунок 2 – Всходы моркови после контактного взаимодействия с круглой стопой шагающего движителя: сразу после взаимодействия (а); через 11 дней после взаимодействия (б)

Рисунок 3 – Распределение эквивалентных грунтовых напряжений по Мизесу (в МПа) под круглой стопой (диаметром 0,4 м) при действии нормальной нагрузки ($q = 0,08$ МПа): в вертикальном сечении (а) и на виде сверху (б)

показали, что поврежденные стопой растения, как правило, не погибают. После некоторого периода угнетенного состояния поврежденные растения возобновляли свой рост (рисунок 2б).

Математическое моделирование контактного взаимодействия стопы с почвогрунтом проводилось с помощью пакета конечно-элементного моделирования ANSYS, предназначенного для решения задач механики деформируемого твердого тела, включая задачи контактного взаимодействия. Контакт стопы с грунтом в опорной фазе считался квазистатическим, так как колебания стопы на вязкоупругом грунте, возникающие после смены стоп, быстро затухают [12]. Была сформулирована пространственная контактная задача для жестких стоп круглой формы, взаимодействующих с линейно упругим полупространством, упругие свойства которого задавались модулем Юнга и коэффициентом Пуассона [7]. Задача решалась в условиях простого нормального нагружения, создаваемого внешними силами, приложенными

к шарниру стопы, при допущении идеального сопряжения контактирующих тел и наличия сил линейного трения в области контакта. Варьировались упругие свойства грунта, среднее давление стопы на грунт, а также размер опорной поверхности стопы.

Результаты и обсуждение. Полученные в результате моделирования характеристики напряженно-деформированного состояния грунта под стопой хорошо согласуются с результатами штамповых испытаний. На рисунке 3,

например, показано распределение эквивалентных грунтовых напряжений по Мизесу под круглой стопой при ее нормальном нагружении. Грунт – влажный суглинок. Наибольшие напряжения, как это видно из рисунка, имеют место по периметру стопы. Поэтому именно здесь наиболее значительные повреждения растений. Грунт непосредственно под стопой нагружен существенно меньше. Этим объясняется меньшая заминаемость растений под центральной частью стопы.

Заключение. Таким образом, заминаемость растений опорными элементами шагающих машин на водонасыщенных грунтах сравнительно небольшая, даже в случае малоразмерных стоп. Колесный движитель, из-за буксования и фрезерного эффекта, повреждает растения существенно больше. Учитывая меньшую площадь уплотнения почвы и отсутствие сплошной колеи, которая является одной из причин водной эрозии почвы, можно сделать вывод, что шагающий способ передвижения в орошаемом земледелии может быть эффективнее традиционных колесных и гусеничных машин [2]. Результаты работы могут быть востребованы при проектировании опорных элементов шагающих машин и роботов, предназначенных для работы в поливном земледелии.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 19-08-01180 а.

Библиографический список

1. Артоболевский, И.И. Особенности и возможности шагающих машин / И. И. Артоболевский, А. П. Бессонов, Н. В. Умнов // Вопросы земледельческой механики. – М.: Изд-во ВИМ, 1978. – С. 41.
2. Брискин, Е.С. Об управлении дождевальными машинами с шагающими движителями / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев, А.В. Малолегов, В.А. Серов [и др.] // Робототехника. Взгляд в будущее. – СПбГТУ. – СПб., 2010. – С. 202-205.
3. Брискин, Е. С. Опыт разработки и испытаний шагающих опор дождевальной машины / Е. С. Брискин, В. В. Чернышев, В. В. Жога, А. В. Малолегов // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2011. – № 9. – С. 27-31.
4. Кемурджиан, А. Л. Планетоходы / А. Л. Кемурджиан, В. В. Громов, И. Ф. Кажукало [и др.] // М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
5. Пат. 2108708 РФ, МПК(6) А 01 G 25/09, В 62 D 57/02. Самоходная тележка многоопорной дождевальной машины / Брискин Е. С., Русаковский А. Е., Чернышев В. В., Жога В. В. [и др.]; заявитель и патентообладатель Волгоградский гос. техн. ун-т. – № 95109634/13; заявл. 07.06.95; опубл. 20.04.98, бюл. № 8.
6. Чернышев, В.В. Исследование взаимодействия шагающего движителя с экологически ранимым почвенным покровом / В.В. Чернышев, Е.С. Брискин // Безопасность жизнедеятельности. – 2012. – № 1. – С. 34–38 + 2-я стр. обл.
7. Чернышев, В.В. Моделирование механики контактного взаимодействия опорных элементов шагающих роботов при больших тяговых усилиях / В.В. Чернышев, А.А. Гончаров, В.В. Арыканцев // Робототехника и техническая кибернетика. – 2019. – № 1 (22). – С. 53-57.
8. Чернышев, В. В. Оценка экологичности и энергоэффективности шагающего движителя на грунтах с низкой несущей способностью / В.В. Чернышев // Вестник СГТУ. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 283-287.
9. Чернышев, В.В. Структура энергозатрат шагающих машин и роботов при реализации больших тяговых усилий / В.В. Чернышев, В.В. Арыканцев // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2019. – № 1. – С. 6-18.
10. Briskin, E.S. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines, Climbing and Walking Robots / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov [et al.] // CLAWAR 2001, Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany. – 2001. – Pp. 1005-1012.
11. Briskin, E.S. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov, V.V. Zhoga // The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (Changchun, Jilin, August 9-12, 2009): conf. proceedings. – [China]. – 2009. – Pp. 3631–3636.
12. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds. Procedia Engineering, 2017. – Vol. 176. – Pp. 387-393.

Bibliographic list

1. Artobolevsky, I.I. Features and capabilities of walking machines / I. I. Artobolevsky, A. P. Bessonov, N. V. Umnov // Questions of agricultural mechanics. – M.: Publishing house of VIM, 1978. – P. 41.
2. Briskin, E.S. On the control of sprinkler machines with walking propellers / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov, V.A. Serov [et al.] // Robotics. Looking into the future. – SPbSTU. – SPb., 2010. – Pp. 202-205.
3. Briskin, ES Experience in the development and testing of walking sprinkler supports / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, V.V. Zhoga, A.V. Maloletov // Tractors and agricultural machines. – 2011. – No. 9. – Pp. 27-31.
4. Kemurdzhian, A. L. Planet rovers / A. L. Kemurdzhian, V. V. Gromov, I. F. Kazhukalo [et al.] // M.: Mashinostroenie, 1982. – 319 p.
5. Pat. 2108708 RF, IPC (6) A 01 G 25/09, B 62 D 57/02. Self-propelled cart of multi-support sprinkler machine / Briskin E. S., Rusakovskiy A. E., Chernyshev V. V., Zhoga V. V. [et al.]; applicant and patentee Volgograd state. tech. un-t. – No. 95109634/13; declared 06/07/95; publ. 04/20/98, bul. no. 8.
6. Chernyshev, V.V. Investigation of the interaction of a walking propeller with an ecologically vulnerable soil cover / V.V. Chernyshev, E.S. Briskin // Life Safety. – 2012. – No. 1. – Pp. 34-38 + 2 cover page.
7. Chernyshev, V.V. Modeling the mechanics of contact interaction of supporting elements of walking robots with large traction efforts / V.V. Chernyshev, A.A. Goncharov, V.V. Arykantsev // Robotics and technical cybernetics. – 2019. – No. 1 (22). – Pp. 53-57.
8. Chernyshev, V.V. Assessment of environmental friendliness and energy efficiency of the walking propulsion unit on soils with low bearing capacity / V.V. Chernyshev // Bulletin of SSTU. – 2012. – Vol. 4, no. 1. – Pp. 283-287.
9. Chernyshev, V.V. The structure of energy consumption of walking machines and robots in the implementation of large traction efforts / V.V. Chernyshev, V.V. Arykantsev // Bulletin of the Southern Federal University. Technical science. – 2019. – No. 1. – Pp. 6-18.
10. Briskin, E.S. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines, Climbing and Walking Robots / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov [et al.] // CLAWAR 2001, Proc. of the 4-th Int. Conf. Karlsruhe, Germany. – 2001. – Pp. 1005-1012.
11. Briskin, E.S. The Investigation of Walking Machines with Movers on the Basis of Cycle Mechanisms of Walking / E.S. Briskin, V.V. Chernyshev, A.V. Maloletov, V.V. Zhoga // The 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics and Automation (Changchun, Jilin, August 9-12, 2009): conf. proceedings. – [China]. – 2009. – Pp. 3631-3636.
12. Chernyshev V.V., Goncharov A.A., Arykantsev V.V. Modeling of vibroimpact processes which occurs in feet changing of the walking units at viscoelastic grounds. Procedia Engineering, 2017. – Vol. 176. – Pp. 387-393.

Дополнительные сведения об авторах:

Антон Александрович Гончаров, старший научный сотрудник, dtm@vstu.ru,

Вадим Викторович Чернышев, профессор кафедры теоретической механики, dtm@vstu.ru,

Николай Геннадьевич Шаронов, доцент кафедры теоретической механики, sharonov@vstu.ru

Additional information about the authors:

Anton Aleksandrovich Goncharov, senior researcher, dtm@vstu.ru,

Vadim Viktorovich Chernyshev, professor of the department of theoretical mechanics, dtm@vstu.ru,

Nikolai Gennadievich Sharonov, associate professor, department of theoretical mechanics, sharonov@vstu.ru