

ВЛИЯНИЕ ЧИСЛА ОСЕЙ КОЛЕСНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЯГОВЫХ МАШИН НА СОПРОТИВЛЕНИЕ КАЧЕНИЮ

THE INFLUENCE OF THE NUMBER OF AXLES OF WHEELED TRANSPORT TRACTION MACHINES ON ROLLING RESISTANCE

И.Н. ШИЛО¹, д.т.н.
Н.Н. РОМАНИУК¹, к.т.н.
А.Н. ОРДА¹, д.т.н.
В.Г. КУШНИР², д.т.н.

¹ Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный технический университет», Минск, Республика Беларусь, romanyuk-nik@tut.by

² Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, Костанай, Республика Казахстан, valkush@mail.ru

I.N. SHILO¹, DSc in Engineering
N.N. ROMANYUK¹, PhD in Engineering
A.N. ORDA¹, DSc in Engineering
V.G. KUSHNIR², DSc in Engineering

¹ Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, romanyuk-nik@tut.by

² Kostanay State University, Kostanay, Kazakhstan, valkush@mail.ru

Процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы» зависит как от режимов эксплуатации техники, так и от изменяющихся свойств почвы в зависимости от ее типа, агрофона и периодов года. Поскольку основная часть потерь энергии при передвижении по полю машинно-тракторных агрегатов тратится на образование следов, то весьма важным является установление влияния числа проходов колес на изменение силы сопротивления качению. Необходимо обоснование закономерности изменения силы сопротивления качению от числа проходов колес по следу в различных почвенных условиях. Это позволит определить перспективные пути улучшения конструкций ходовых систем, в частности обосновать число осей колесных транспортно-тяговых машин. В статье показана графическая зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы. Проанализировано влияние параметров колесной ходовой системы транспортного средства на сопротивление качению по сильно упрочняющейся почве. Определено сопротивление качению при повторных проходах колес на слабо упрочняющихся почвах. Обоснованы зависимости силы сопротивления качению колес от числа проходов по следу при различных состояниях опорной поверхности. Рассмотрены варианты сильно упрочняющейся и слабо упрочняющейся почв. Экспериментальные исследования тягово-сцепных свойств многоосного колесного хода проводились на механической модели в почвенном канале. Предложенные закономерности изменения силы сопротивления качению при повторных проходах колес по следу учитывают тип и состояние почвы. Увеличение числа осей способствует снижению сопротивления качению.

Ключевые слова: транспортно-тяговая машина, почва, колесо, сопротивление качению, число проходов, напряжение, давление.

The process «deformation – compaction – decomposition – accumulation of soil compaction» depends both on the operating conditions of the equipment and on the changing properties of the soil depending on its type, agricultural background and periods of the year. Since the main part of energy losses during movement across the field of machine-tractor units is spent on the formation of tracks, it is very important to establish the influence of the number of wheel passes on changes in the rolling resistance force. It is necessary to substantiate the pattern of change in the rolling resistance force on the number of wheel passes on the track in various soil conditions. This will make it possible to identify promising ways to improve the design of the undercarriage systems, in particular, to justify the number of axles of wheeled transport and traction machines. The article obtained a graphical dependence of the rolling resistance force of the wheeled suspension system on the number of axles for highly hardening soil. The influence of the parameters of the vehicle's wheel drive system on rolling resistance on heavily hardened soil is analyzed. The rolling resistance at repeated passes of the wheels on weakly hardening soils is determined. The dependences of the rolling resistance force on wheels on the number of tracks on the track for various states of the bearing surface are substantiated. The variants of strongly hardening and weakly hardening soils are considered. Experimental studies of the multi-axle wheel travel traction properties were carried out on a mechanical model in the soil channel. The proposed patterns of change in the rolling resistance force during repeated wheel passes on the track take into account the type and condition of the soil. Increasing the number of axles contributes to lower rolling resistance.

Keywords: transport and traction machine, soil, wheel, rolling resistance, number of passes, stress, pressure.

Введение

Воздействие ходовых систем транспортно-тяговых машин ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Повышение плотности почвы, вызванное воздействием ходовых систем, приводит к увеличению ее твердости в 2–3 раза. Между твердостью, плотностью и удельным сопротивлением почвы при вспашке существует тесная корреляционная связь. Удельное сопротивление при обработке пахотного слоя после прохода тракторов повышается на 15–65 %, а транспортных средств и комбайнов – на 60–90 % [1, 2].

Происходящий в результате воздействия ходовых систем транспортно-тяговых машин на почву процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы» зависит как от режимов эксплуатации техники, так и от изменяющихся свойств почвы в зависимости от ее типа, агрофона и периодов года. Деформация почвы колесами сопровождается расходом энергии на преодоление возникающей силы сопротивления качению. Поскольку основная часть потерь энергии при передвижении по полю машинно-тракторных агрегатов тратится на образование следов, то весьма важным является установление влияния числа проходов колес на изменение силы сопротивления качению.

Цель исследования

Целью исследования является обоснование закономерности изменения силы сопротивления качению от числа проходов колес по следу в различных почвенных условиях. Это позволит определить перспективные пути улучшения конструкций ходовых систем, в частности обосновать число осей колесных транспортно-тяговых машин.

Материалы и методы

В теории транспортно-тяговых машин для оценки затрат энергии на деформацию почв и грунтов используют термин «коэффициент сопротивления качению», представляющий собой отношение силы сопротивления качению к весу машины [3].

При передвижении ходовых систем по почве сопротивление качению обуславливается, в основном, потерями энергии на деформацию почвы.

Работа вертикальной деформации почвы при i -м проходе колеса равна:

$$W_{\sigma_i} = A \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh,$$

где A – площадь пятна контакта колеса с почвой, м²; h_{i-1} – глубина следа при $(i-1)$ -м проходе колеса, м; h_i – глубина следа при i -м проходе колеса, м; $\sigma_i(h)$ – зависимость между напряжением и осадкой при i -м проходе колеса, м.

Суммарная величина работы после n нагружений

$$W_{\sigma} = A \sum_{i=1}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh.$$

Значения работы при i -м проходе колеса за один оборот и после n проходов будут равны соответственно:

$$W_{\sigma_i} = 2\pi \cdot r \cdot B_k \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh, \quad (1)$$

$$W_{\sigma_n} = 2\pi \cdot r \cdot B_k \cdot \sum_{i=1}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh, \quad (2)$$

где r – радиус колеса, м; B_k – ширина контакта колеса с почвой, м.

С другой стороны, работа сил сопротивления качению равна

$$W = 2\pi \cdot r \cdot F_f, \quad (3)$$

где F_f – сила сопротивления качению колесного хода, Н.

Приравняв правые части уравнений (1) и (3), находим значение силы сопротивления качению при i -м проходе колеса

$$F_{f_i} = B_k \cdot \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh. \quad (4)$$

Аналогично из уравнений (2) и (3) находим суммарную силу сопротивления качению n -осного колесного хода

$$F_{f_n} = B_k \cdot \sum_{i=1}^n \int_{h_{i-1}}^{h_i} \sigma_i(h) dh. \quad (5)$$

Результаты и их обсуждение

Для сильно упрочняющихся почв суммарную силу сопротивления качению n -осного хода найдем исходя из того, что функция $\sigma(h)$ для сильно упрочняющихся почв является непрерывной. Поэтому к уравнению (5) можно применить свойство аддитивности интеграла [4]

$$F_{f_n} = B_k \cdot \int_0^{h_n} \sigma(h) dh.$$

Зависимость между сопротивлением и осадкой почвы подчиняется функции гиперболического тангенса [5]:

$$\sigma = p_0 \cdot \operatorname{th} \left(\frac{k}{p_0} \cdot h \right), \quad (6)$$

где p_0 – предел несущей способности почвы, Па; k – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м³.

С учетом зависимости (6) формула силы сопротивления качению примет вид:

$$F_{f_n} = B_k \cdot \int_0^{h_n} p_0 \cdot \operatorname{th} \left(\frac{k}{p_0} \cdot h \right) dh.$$

Значение этого интеграла

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left| \ln \operatorname{ch} \left(\frac{k}{p_0} \cdot h \right) \right|_0^{h_n}.$$

Значение h_n определяется по формуле [6]:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \cdot \operatorname{Arch} \left(\frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2/p_0^2}} \right), \quad (7)$$

где B – коэффициент накопления повторных осадок сильно упрочняющейся почвы.

Подставив вместо верхнего предела интегрирования h_n его значение, определяемое формулой (7), с учетом того, что контактное напряжение σ_1 равно давлению колеса на почву q , получим

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \operatorname{ch} \left(\operatorname{Arch} \frac{n^B}{\sqrt{1 - q^2/p_0^2}} \right)$$

или

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{n^B}{\sqrt{1 - q^2/p_0^2}}. \quad (8)$$

При первом нагружении ($n = 1$)

$$F_{f_1} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1 - q^2/p_0^2}}.$$

На основании формулы (8) получена графическая зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы (рис. 1). Значения параметров колес и свойств почвы были равны: $B_k = 0,3$ м; $k = 2800$ кН/м³; $B = 0,01$, $p_0 = 500$ кПа.

Из рис. 1 видно, что сила сопротивления качению в основном формируется при первом проходе колеса. При каждом последующем проходе колеса по следу приращение силы сопротивления качению снижается.

Проанализируем, как влияют параметры колесной ходовой системы транспортного средства на сопротивление качению по сильно упрочняющейся почве.

В случае изменения давления в зависимости, обратно пропорциональной количеству осей системы, формула (8) примет вид:

$$P_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{N^B}{\sqrt{1 - (\xi \cdot F/A_k \cdot N \cdot p_0)^2}},$$

где ξ – коэффициент распределения давлений под опорной поверхностью колеса; F – нагрузка на ходовую систему, Н; A_k – площадь опорной поверхности колеса, м²; N – число осей ходовой системы, шт.

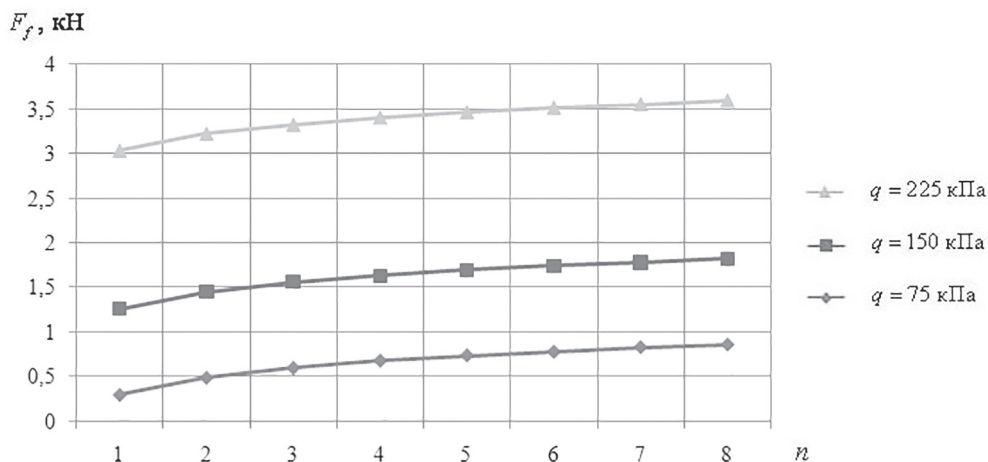


Рис. 1. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы

Из рис. 2, построенного на основании данной зависимости, видно, что при сохранении общей постоянной нагрузки на ходовую систему увеличение числа осей способствует снижению силы сопротивления качению.

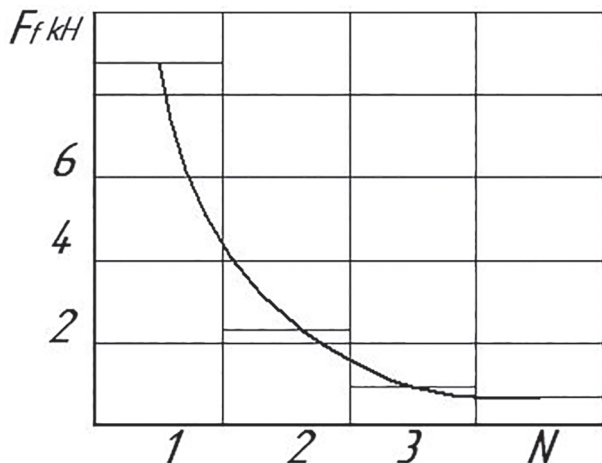


Рис. 2. Влияние числа осей на сопротивление качению при постоянной общей нагрузке для сильно упрочняющейся почвы

Найдем сопротивление качению при повторных проходах колес на слабо упрочняющихся почвах. Для этого воспользуемся зависимостью суммарной силы сопротивления качению n -осного колесного хода (5) и зависимостями напряжений от деформаций почвы.

Зависимость между напряжением и осадкой при n -м нагружении слабо упрочняющейся почвы имеет вид [6]:

$$\sigma_n = p_0 \cdot \text{th} \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{1}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \cdot \Delta h_n \right), \quad (9)$$

где k_u – коэффициент интенсивности накопления повторных осадок для слабоупрочняющейся почвы; Δh_n – приращение осадки при n -м нагружении, м.

В результате преобразований зависимостей (5), (6) и (9) получим

$$F_{fn} = B_k \left[\int_0^{h_1} p_0 \cdot \text{th} \left(\frac{k}{p_0} \cdot h \right) dh + \int_0^{h_2-h_1} p_0 \cdot \text{th} \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{h}{k_u \cdot \lg 2} \right) dh + \dots + \int_0^{h_n-h_{n-1}} p_0 \cdot \text{th} \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{h}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \right) dh \right].$$

Проинтегрировав это выражение, получим

$$F_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left[\ln \text{ch} \left(\frac{k}{p_0} \cdot h_1 \right) + k_u \cdot \lg 2 \times \ln \text{ch} \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_2-h_1}{k_u \cdot \lg 2} \right) + \dots + k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \times \ln \text{ch} \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_n-h_{n-1}}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \right) \right]$$

или

$$F_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left[\ln \text{ch} \left(\frac{k}{p_0} \cdot h_1 \right) + k_u \times \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln \text{ch} \left(\frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_i-h_{i-1}}{k_u \cdot \lg(i/(i-1))} \right) \right]. \quad (10)$$

Найдем зависимость F_f в функции давления $q = \sigma_1$. Представим зависимость (6) в виде:

$$\frac{k}{p_0} \cdot h_1 = \text{Arth} \frac{q}{p_0}.$$

Известно, что

$$\text{Arth} \frac{q}{p_0} = \text{Arch} \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}}.$$

Тогда

$$\frac{k}{p_0} \cdot h_1 = \text{Arch} \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}}. \quad (11)$$

Приращение осадки при n -м приложении нагрузки ($h_n - h_{n-1}$) определяется по формуле [7]:

$$\Delta h_n = k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_0}{k} \cdot \text{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right). \quad (12)$$

Подставив в зависимость (10) вместо $(k/p_0)h_1$ его значение (11) и вместо разности $(h_i - h_{i-1})$ – выражение (12), получим:

$$F_{fn} = B \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \left[\ln \text{ch} \left(\text{Arch} \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} \right) + k_u \cdot \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln \text{ch} \left(\text{Arth} \frac{q}{p_0} \right) \right] = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \times \left(\ln \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} + k_u \cdot \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} \right).$$

После преобразований получим

$$F_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1 - q^2/p_0^2}} \cdot (1 + k_u \cdot \lg n). \quad (13)$$

На основании формулы (13) построим график зависимости силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для слабо упрочняющейся почвы (рис. 3).

Значения параметров колес и свойств почвы были равны: $B_k = 0,3 \text{ м}$; $k = 1000 \text{ кН/м}^3$; $k_u = 1$, $p_0 = 350 \text{ кПа}$.

Из рис. 3 видно, что при давлении колес на почву $q = 75 \text{ кПа}$ прирост силы сопротивления качению незначительный. При более высоких давлениях интенсивность приращения силы сопротивления качению при последующих проходах колес возрастает.

В случае изменения давления в зависимости, обратно пропорциональной числу осей хо-

довой системы, на слабо упрочняющейся почве зависимость (13) примет вид:

$$F_{fn} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \cdot \ln \frac{1}{\sqrt{1 - (\xi \cdot F / A_k \cdot N \cdot p_0)^2}} \times (1 + k_u \cdot \lg n).$$

Из рис. 4, построенного на основании данной зависимости, видно, что при увеличении числа осей глубина следа снижается. При этом интенсивность снижения глубины следа по сравнению с сильно упрочняющимися почвами уменьшается.

Экспериментальные исследования тягово-сцепных свойств многоосного колесного хода проводились на механической модели в почвенном канале. Применялись шины 5.00-10.00 несущих колес с неразвитыми почвозацепами (рис. 5).

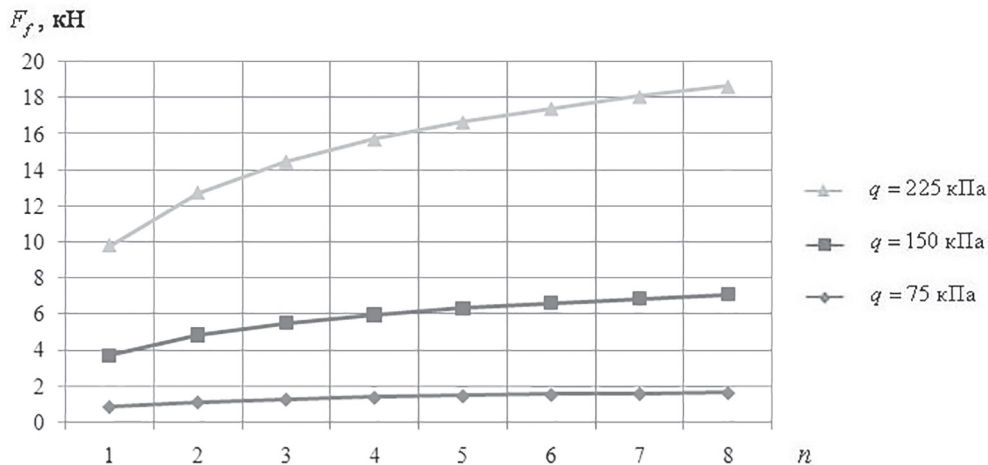


Рис. 3. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для слабо упрочняющейся почвы

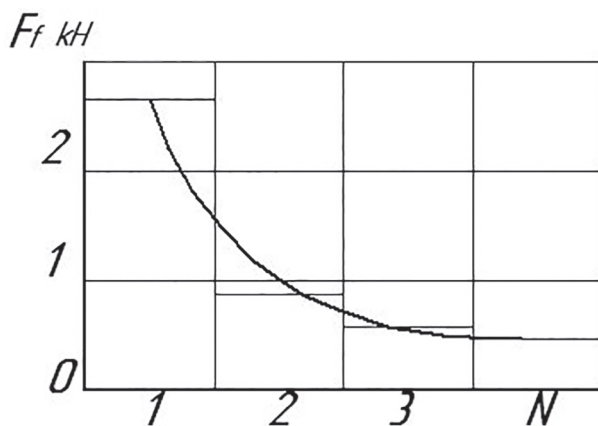


Рис. 4. Влияние числа осей на сопротивление качению при постоянной общей нагрузке для слабо упрочняющейся почвы

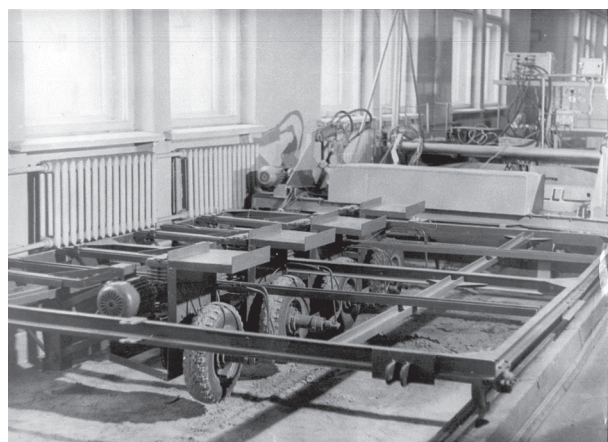


Рис. 5. Общий вид модели многоосного колесного хода с тележкой почвенного канала

Из рис. 6 видно, что основная часть силы сопротивления качению приходится на первое колесо. Увеличение числа осей при сохранении постоянной нагрузки (давление колес на почву изменяется в обратную пропорциональную зависимости от числа осей) сопротивление качению снижается. Нагрузка на ходовую систему равнялась 5,2 кН.

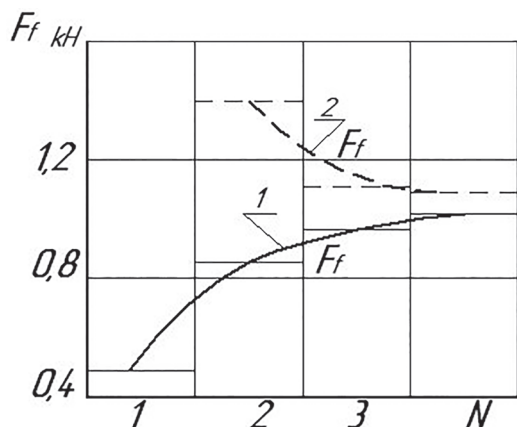


Рис. 6. Влияние числа осей на сопротивление качению модели многосевого колесного хода:
 1 ————— — давление колес на почву одинаковое;
 2 - - - - - — давление изменяется в обратную пропорциональную зависимости от числа осей

Выводы

Предложенные закономерности изменения силы сопротивления качению при повторных проходах колес по следу учитывают тип и состояние почвы. Для сильно упрочняющихся почв наибольшая энергия на передвижение расходуется при первом проходе колеса. Для слабо упрочняющихся почв при давлении колес на почву свыше 150 кПа происходит интенсивный прирост силы сопротивления качению при последующих проходах колес по следу. Для обоих типов почв при сохранении постоянной общей нагрузки на ходовую систему увеличение числа осей способствует снижению сопротивления качению.

Литература

1. Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Шкляревич В.А., Воробей А.С. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин // *Агропанорама*. 2016. № 2. С. 2–8.
2. Романюк Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: дис. канд. техн. наук. Минск, 2008. 206 с.
3. Парфенов А.П., Щетинин Ю.С. Об унификации некоторых терминов и понятий, применяемых

при изучении наземных транспортно-технологических средств // *Тракторы и сельхозмашины*. 2018. № 1. С. 40–45.

4. Шило И.Н., Орда А.Н., Романюк Н.Н., Нукешев С.О., Кушнир В.Г. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа // *Тракторы и сельхозмашины*. 2016. № 4. С. 37–42.
5. Кацыгин В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий // *Вопросы сельскохозяйственной механики*. Минск: Ураджай, 1964. Т. 13. С. 5–147.
6. Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н., Шкляревич В.А., Воробей А.С. Закономерности накопления повторных осадков почвы при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники // *Агропанорама*. 2014. № 6. С. 2–7.
7. Орда А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. ... докт. техн. наук: 05.20.03. Минск, 1997. 269 с.

References

1. SHilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., SHklyarevich V.A., Vorobej A.S. Patterns of soil compaction under the influence of agricultural machinery wheels. *Agropanorama*. 2016. No 2, pp. 2–8 (in Russ.).
2. Romanyuk N.N. Snizhenie uplotnyayushchego vozdejstviya na pochvu vertikal'nymi vibrodinamicheskimy nagruzkami pnevmokolesnyh dvizhitelej: dis... kand. tekhn. nauk [Reducing the compaction effect on the soil by the vertical vibrodynamic loads of pneumatic wheel propulsion: Dissertation for degree of Ph.D. in Engineering]. Minsk, 2008. 206 p.
3. Parfenov A.P., SHCHetinin YU.S. Unification of some terms and concepts used in the study of land transport and technological means. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2018. No 1, pp. 40–45 (in Russ.).
4. SHilo I.N., Orda A.N., Romanyuk N.N., Nukeshev S.O., Kushnir V.G. The effect of the number of axles of the undercarriage systems of mobile agricultural machinery on the depth of the track. *Traktory i sel'hozmashiny*. 2016. No 4, pp. 37–42 (in Russ.).
5. Kacygin V.V. Fundamentals of the theory of choosing the optimal parameters of mobile agricultural machines and tools. *Voprosy sel'skohozyajstvennoj mekhaniki*. Minsk: Uradzhaj Publ., 1964. Vol. 13, pp. 5–147 (in Russ.).
6. SHilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., SHklyarevich V.A., Vorobej A.S. Regularities of accumulation of repeated sediments of soil under the influence of running systems of mobile agricultural equipment. *Agropanorama*. 2014. No 6, pp. 2–7 (in Russ.).
7. Orda A.N. EHkologo-ehnergeticheskie osnovy formirovaniya mashinno-traktornyh agregatov: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.20.03 [Ecological and energy bases of the formation of machine-tractor units: Dissertation for degree of Dr.Eng.]. Minsk, 1997. 269 p.