

## ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ СИЛЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ КАЧЕНИЮ КОЛЕС МАШИННО- ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

**И. Н. Шило,**

ректор БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

**Н. Н. Романюк,**

первый проректор БГАТУ, канд. техн. наук, доцент

**А. Н. Орда,**

зав. каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ, докт. техн. наук, профессор

**В. А. Шкляревич,**

ст. преподаватель каф. теоретической механики и теории механизмов и машин БГАТУ

**А. С. Воробей,**

ст. науч. сотр. РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства», канд. техн. наук

*В статье обоснованы зависимости силы сопротивления качению колес от числа проходов по следу при различных состояниях опорной поверхности. Рассмотрены варианты сильно упрочняющейся почвы, слабо упрочняющейся почвы и почвы, подготовленной под посев.*

*Ключевые слова: машинно-тракторный агрегат, почва, колесо, сопротивление качению, число проходов, напряжение, давление.*

*In the article dependences of resistance force to swing of wheels on a number of passes on a trace at various conditions of a basic surface are proved. Options of strongly strengthened soil, poorly strengthened soil and the way paved under crops are considered.*

*Keywords: machine and tractor unit, soil, wheel, resistance to swing, number of passes, tension, pressure.*

### Введение

Воздействие ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Повышение плотности почвы, вызванное воздействием движителей тракторов и сельскохозяйственных машин, привело к увеличению твердости почвы 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].

Процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы», происходящий в результате воздействия ходовых систем МТА на почву, 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 изменения силы сопротивления качению.

### Основная часть

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:

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

где  $A$  – площадь пятна контакта колеса с почвой,  $m^2$ ;  
 $h_{i-1}$  – 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

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

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

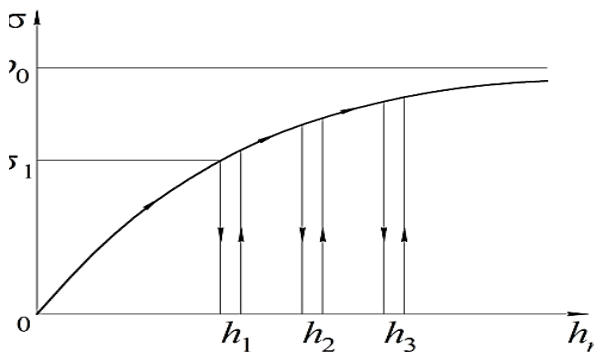


Рисунок 1. Закономерности накопления повторных осадок для сильно упрочняющихся почв

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

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 (рис. 1). Поэтому к уравнению (5) можно применить свойство аддитивности интеграла:

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

Зависимость между сопротивлением и осадкой для сильно упрочняющихся почв подчиняется функции гиперболического тангенса [3]:

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

где  $p_0$  – предел несущей способности почвы, Па;  
 $k$  – коэффициент объемного смятия почвы, Н/м<sup>3</sup>.

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

$$F_{f_n} = B_k \cdot \int_0^{h_n} p_0 \cdot th \frac{k}{p_0} \cdot h dh. \quad (7)$$

Значение этого интеграла

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

Значение  $h_n$  определяется по формуле [4]:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \cdot Arch \left( \frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / p_0^2}} \right), \quad (8)$$

где  $B$  – коэффициент накопления повторных осадок сильно упрочняющейся почвы.

Подставив вместо верхнего предела интегрирования  $h_n$  его значение, определяемое формулой (8), и с учетом того, что контактное напряжение  $\sigma_1$  равно давлению колеса на почву  $q$ , получим:

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

или

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \ln \frac{n^B}{\sqrt{1 - q^2 / p_0^2}}. \quad (9)$$

При первом нагружении ( $n = 1$ )

$$F_{f_1} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \ln \frac{1}{\sqrt{1 - q^2 / p_0^2}}. \quad (10)$$

На рис. 2 приведена графическая зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы.

Из рис. 2 видно, что сила сопротивления качению в основном формируется при первом проходе колеса. При каждом последующем проходе колеса по следу приращение силы сопротивления качению снижается.

Найдем сопротивление качению при повторных проходах колес на слабо упрочняющихся почвах (рис. 3). Для этого воспользуемся зависимостью суммарной силы сопротивления качению  $n$ -осного колесного хода (5) и зависимостями напряжений от деформаций почвы.

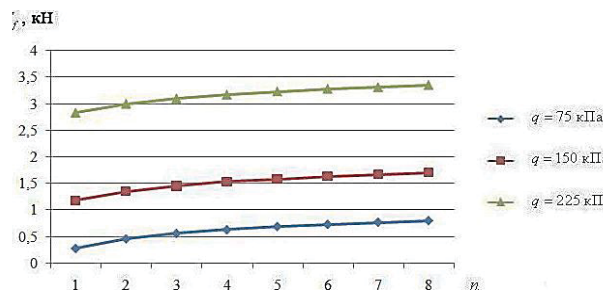


Рисунок 2. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для сильно упрочняющейся почвы

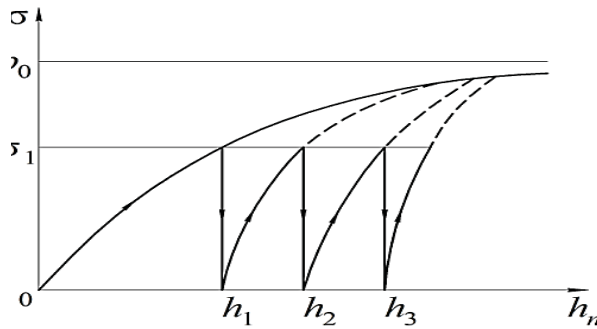


Рисунок 3. Закономерности накопления повторных осадок для слабо упрочняющихся почв

Зависимость между напряжением и осадкой при  $n$ -ом нагружении слабо упрочняющейся почвы имеет вид [5]:

$$\sigma_n = p_0 \cdot th \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{1}{k_u \cdot \lg(n/(n-1))} \cdot \Delta h_n \right), \quad (11)$$

где  $k_u$  – коэффициент интенсивности накопления повторных осадок для слабоупрочняющейся почвы;  $\Delta h_n$  – приращение осадки при  $n$ -м нагружении.

В результате преобразований зависимостей (5), (6) и (11) получим

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

Проинтегрировав это выражение, получим:

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

или

$$F_{f_n} = B_k \cdot \frac{p_0^2}{k} \left[ \ln ch \left( \frac{k}{p_0} \cdot h_1 \right) + k_u \cdot \sum_{i=2}^n \lg \frac{i}{i-1} \cdot \ln ch \left( \frac{k}{p_0} \cdot \frac{h_i-h_{i-1}}{k_u \cdot \lg(i/(i-1))} \right) \right]. \quad (12)$$

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

$$\frac{k}{p_0} h_1 = Arth \frac{q}{p_0}. \quad (13)$$

Известно, что

$$Arth \frac{q}{p_0} = Arch \frac{1}{\sqrt{1-q/p_0^2}}. \quad (14)$$

Тогда выражение (13) примет вид:

$$\frac{k}{p_0} h_1 = Arch \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}}. \quad (15)$$

Приращение осадки при  $n$ -ом приложении нагрузки ( $h_n - h_{n-1}$ ) определяется по формуле

$$\Delta h_n = k_u \cdot \lg \frac{n}{n-1} \cdot \frac{p_0}{k} Arth \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right) \quad (16)$$

Подставив в зависимость (12) вместо  $(k/p_0)h_1$  его значение (15) и вместо разности  $(h_i - h_{i-1})$  выражение (16), получим:

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

или

$$F_{f_n} = B_k \frac{p_0^2}{k} \ln \frac{1}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} (1 + k_u \lg n). \quad (17)$$

На основании формулы (17) построим график зависимости силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для слабо упрочняющейся почвы (рис. 4).

Из рис. 4 видно, что при давлении колес на почву  $q = 75$  кПа прирост силы сопротивления качению незначительный. При более высоких давлениях интенсивность приращения силы сопротивления качению при последующих проходах колес возрастает.

Найдем сопротивление качению колесных ходов для почвы, подготовленной под посев. Для такой почвы зависимость между напряжением и деформацией описывается следующей формулой [5]:

$$\sigma = \frac{a}{b} \cdot tg(abh), \quad (18)$$

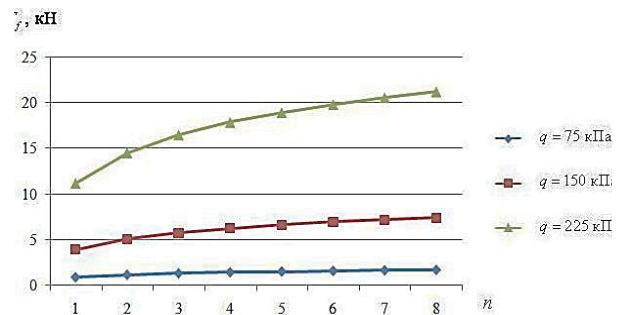


Рисунок 4. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для слабо упрочняющейся почвы

где  $a = \sqrt{k_0}$ ,  
 $b = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{h_{\text{упл}} \sqrt{k_0}}$ ,

$$h_{\text{упл}} = H \cdot \frac{\varepsilon_0 - \varepsilon_{\text{min}}}{(1 + \varepsilon_0) [1 - 2 \cdot \nu (1 + \varepsilon_{\text{min}})]},$$

где  $k_0$  – коэффициент объемного смятия почвы, подготовленной под посев, Н/м<sup>3</sup>;

$h_{\text{упл}}$  – предельная величина деформации, м;

$H$  – высота пахотного слоя, м;

$\varepsilon_0$  – коэффициент пористости почвы до нагружения;

$\varepsilon_{\text{min}}$  – минимально возможный коэффициент пористости почвы;

$\nu$  – коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

Зависимость накопления повторных осадков для почвы, подготовленной под посев, имеет вид [5]:

$$h_n = \frac{1}{a \cdot b} \text{Arc cos} \left( \frac{n^{-B_1}}{\sqrt{1 + (b^2 / a^2) \cdot \sigma^2}} \right). \quad (19)$$

На рис. 5 приведен график зависимости между напряжением и осадкой при повторных нагружениях, построенный на основании зависимости (19).

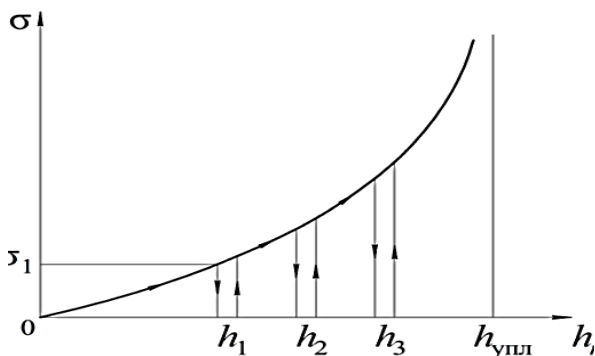


Рисунок 5. Закономерности накопления повторных осадков для почвы, подготовленной под посев

При этом зависимость  $\sigma(h)$  при повторных нагружениях является непрерывной. С учетом этого, зависимость (5) может быть преобразована к виду:

$$F_{fn} = B_k \int_0^{h_n} \frac{a}{b} \text{tg}(abh) dh. \quad (20)$$

Решение интеграла (20) примет вид

$$F_{fn} = -\frac{B_k}{b^2} \left| \ln \cos(abh) \right|_0^{h_n}.$$

Подставив вместо верхнего предела интегрирования  $h_n$  его значение, определяемое формулой (19), и учитывая, что  $\sigma_1 = q$ , получим

$$F_{fn} = -\frac{B_k}{b^2} \ln \left( \frac{n^{-B_1}}{\sqrt{1 + (b^2 / a^2) \cdot q^2}} \right). \quad (21)$$

На основании формулы (21) получена графическая зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для почвы, подготовленной под посев (рис. 6).

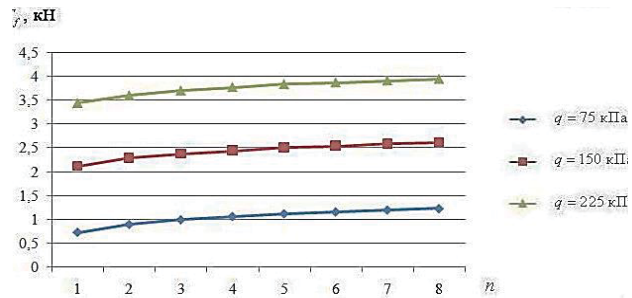


Рисунок 6. Зависимость силы сопротивления качению колесной ходовой системы от числа осей для почвы, подготовленной под посев

Из рис. 6 видно, что для почвы, подготовленной под посев, интенсивность прироста силы сопротивления качению меньше, чем для слабо упрочняющихся почв. Это объясняется наличием у почв, подготовленных под посев, плотного подстилающего основания.

### Заключение

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 почвы, подготовленной под посев, наличие пахотного подстилаемого слоя способствует снижению интенсивности нарастания силы сопротивления качению.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шило, И.Н. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин / И. Н. Шило, Н. Н. Романюк, А. Н. Орда, В. А. Шкляревич, А. С. Воробей // Агропанорама, 2016. – № 2. – С. 2-8.
2. Романюк, Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.03; 05.20.01/ Н.Н. Романюк. – Минск, 2008. – 206 л.
3. Кацыгин, В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы сель-

скохозяйственной механики. – Минск: Ураджай, 1964. – Т. 13. – С. 5-147.

4. Шило, И.Н. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа / И. Н. Шило, А. Н. Орда, Н. Н. Романюк, С. О. Нукешев, В.Г. Кушнир // Тракторы и сельхозмашины, 2016. – №4. – С. 37-42.

5. Шило, И. Н. Закономерности накопления вторичных осадков почвы при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники / И. Н. Шило, Н. Н. Романюк, А. Н. Орда, В. А. Шкляревич, А. С. Воробей // Агропанорама, 2014.– №6. – С. 2-7.

ПОСТУПИЛА В РЕДАКЦИЮ 22.05.2017

УДК 621.431

## **ДИАГНОСТИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ И ГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ ТРАНСМИССИИ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ РАСХОДА ТОПЛИВА МОБИЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СРЕДСТВ**

**Д.А. Жданко,**

*зав. каф. эксплуатации машинно-тракторного парка БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**А.В. Новиков,**

*профессор каф. эксплуатации машинно-тракторного парка БГАТУ, канд. техн. наук, доцент*

**Д.И. Сушко,**

*аспирант каф. эксплуатации машинно-тракторного парка БГАТУ*

**А.А. Шиш,**

*студент агромеханического факультета БГАТУ*

*В статье рассмотрены вопросы определения эффективной мощности двигателей мобильных энергетических средств и ее потерь в гидростатической трансмиссии путем создания тормозного момента на коленчатом валу двигателя с использованием насоса гидростатической трансмиссии и дополнительного дросселя постоянного сечения.*

*Ключевые слова: мобильное энергетическое средство, гидростатическая трансмиссия, собственный гидронасос, тормозной момент, дроссель, мощность двигателя, техническое обслуживание.*

*The article considers the issues of determining the effective power of mobile power equipment engines and their losses in a hydrostatic transmission by creating a braking torque on the crankshaft of the engine using a hydrostatic transmission pump and an additional constant-flow choke.*

*Keywords: mobile power means, hydrostatic transmission, own hydraulic pump, braking torque, throttle, engine power, maintenance.*

### **Введение**

В структуре себестоимости продукции растениеводства затраты на топливо-смазочные (ТСМ) материалы составляют по данным отчетов сельскохозяйственных предприятий до 11 %. С увеличением единичной мощности двигателей мобильных энергетических средств (МЭС) эти затраты не только не снизились, но и имеют тенденцию к увеличению.

Резервы снижения расхода ТСМ заключаются в использовании современных технологий возделывания сельскохозяйственных культур, четкой организации использования МЭС в составе комплексов с многочисленной техникой и поддержание их в технически исправном состоянии.

Среди названных резервов особое значение имеет техническое состояние двигателей МЭС, так как возникновение у них множества различных неисправностей сопровождается повышением расхода ТСМ. Особенную роль играет состояние систем и агрегатов двигателя, определяющих его мощность.

По результатам исследований [1] из-за неисправностей двигателя эффективной мощностью 200 л.с., сопровождающих его в течение года, потери топлива могут составить до 90 т/год на один трактор или МЭС.

Эффективная мощность двигателя является обобщенным показателем его технического состояния. Исправным принято считать [2] двигатель, фактическое значение эффективной мощности которого не ниже 95 % и не выше 107 % номинального значения.

Существует мнение, что падение мощности двигателя механизатор замечает без использования каких бы то ни было приборов, но оказывается, что это не так. В Челябинском институте механизации сельского хозяйства [3] в свое время было установлено, что в энергонасыщенных тракторах механизаторы замечают падение мощности, если оно превышает 25 % номинального значения. Даже при абсолютно исправной системе питания двигателя удельный расход топлива на единицу его мощности будет повышаться эквивалентно снижению эффективной мощности.