

МЕХАНИЗАЦЫЯ І ЭНЕРГЕТЫКА MECHANIZATION AND POWER ENGINEERING

УДК 629.3.014.2:631.43

Поступила в редакцию 22.06.2016
Received 22.06.2016**И. Н. Шило¹, Н. Н. Романюк¹, А. Н. Орда¹, В. А. Шкляревич¹, А. С. Воробей²**

¹Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ordaan@tut.by
²Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства, Минск, Беларусь

ЗАКОНОМЕРНОСТИ СЛЕДОБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОЧВОЙ МНОГООСНОЙ ХОДОВОЙ СИСТЕМЫ МАШИННО-ТРАКТОРНЫХ АГРЕГАТОВ

Научно-технический прогресс в сельском хозяйстве сопровождается не только благоприятными, рациональными изменениями, но и отрицательными: возникает и усиливается эрозия почв, почва чрезмерно уплотняется, уменьшается содержание гумуса, идет засоление почв и т. д. В период интенсификации сельскохозяйственного производства необходимо требовательно оценивать конструкцию ходовых систем сельскохозяйственных машин, работающих в растениеводстве, так как создается ситуация, когда новые машины, призванные повысить урожай, снижают плодородие почвы. Почва, являясь средой для выращивания сельскохозяйственных культур, все большей мере начинает выполнять функцию несущего основания для движителей сельскохозяйственных машин, которые оказывают на нее механическое воздействие. Наибольшее воздействие осуществляется движителями тракторов, мощность и масса которых неуклонно растет. Так, урожайность зерновых в следах тракторов снижается на 10–15 %, а корнеклубнеплодов – на 20–30 %. В статье приведены исследования, позволяющие определить закономерности накопления повторных осадков. Получены зависимости для определения деформации почвы с различными физико-механическими свойствами при различных режимах нагружения и компоновке ходовых систем машинно-тракторных агрегатов. Установлено, как влияет на глубину следа соотношение величины давления движителя на почву с пределом ее несущей способности. Полученные данные могут быть применены в качестве исходных данных для определения рациональных параметров ходовых систем.

Ключевые слова: деформация почвы, многоосная ходовая система, повторное нагружение, напряжение, глубина следа, осадка почвы, режим работы.

I. N. Shilo¹, N. N. Romanyuk¹, A. N. Orda¹, V. A. Shkliarevich¹, A. S. Vorobei²

¹The Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Belarus, e-mail: ordaan@tut.by

²The Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus on Agriculture Mechanization, Minsk, Belarus

RULES OF TRACE FORMATION AT CONTACT OF MULTIAxis RUNNING SYSTEM OF MACHINE AND TRACTOR UNITS WITH SOIL

The scientific and technological progress in agriculture is accompanied by not only favorable and rational changes, but also by negative ones: soil erosion is enhanced, soil is excessively compacted, humus content decreases, soil is salinized, etc. During the period of intensification of agricultural production, one has to evaluate the design of running systems of agricultural machinery working at plant breeding, as a situation arises when new machines designed to increase yields, reduce the soil fertility. The soil as a medium for growing agricultural crops more often performs the function of a support base for propelling units of agricultural machines, which impact the soil mechanically. The greatest impact is carried out by tractors' propelling units, with constantly growing power and weight. Thus, the yield of grain in tractors' tracks is reduced by 10–15 %, and of tuberous roots – by 20–30 %. The article presents the studies allowing to determine the patterns of accumulation of repeated compactations. The dependences for determination of soil deformation with different physical and mechanical properties under various loading conditions and arrangement of running systems of machine and tractor units are obtained. It was determined how correlation of propeller unit pressure on soil affects the depth of track with the limit of its bearing capacity. The data obtained can be used as initial data to determine rational parameters of running systems.

Keywords: soil deformation, multiaxis running system, repeated loading, pressure, track depth, soil compaction, work mode.

Уплотнение почвы из-за воздействия ходовых систем МТА ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Так, урожайность зерновых в следах тракторов снижается на 10–15 %, а корнеклубнеплодов – на 20–30 % [1, 2]. 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 % [3–5].

Происходящий в результате воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) на почву процесс «деформирование – уплотнение – разуплотнение – накопление уплотнения почвы» зависит как от режимов эксплуатации мобильной сельскохозяйственной техники, так и от изменяющихся свойств почвы в зависимости от ее типа, агрофона и периодов года. Поэтому прогнозирование показателей воздействия на почву ходовых систем МТА, учитывающих тип и состояние почвенного агрофона, позволит определить перспективные пути улучшения конструкций ходовых систем с повышенными агроэкологическими свойствами.

На основании зависимости Больцмана, которая отражает связь между энтропией процесса и вероятностью данного состояния, получены закономерности накопления повторных осадок сильно упрочняющихся связных и слабо упрочняющихся почв в зависимости от режимов нагружения и компоновки ходовых систем машинно-тракторных агрегатов.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований установлено, что у сильно упрочняющихся почв след формируется и стабилизируется после первого прохода колеса. При последующих проходах колес по следу приращение осадки незначительное, поэтому на таких почвах рекомендуется применять многоосные ходовые системы, так как сопротивление качению при последующих проходах будет снижаться.

У слабо упрочняющихся почв период стабилизации осадки больше, чем у сильно упрочняющихся почв, при последующих проходах колес по следу нарастание осадки весьма ощутимо. Поэтому для таких почв рекомендуется применять движители, у которых колеса не перемещаются по следу предыдущих опор.

В общем случае у почв накопление повторных деформаций при небольших удельных нагрузках происходит в основном за счет составляющей от повышения напряжений. При увеличении отношения давления к несущей способности почвы доля этой составляющей падает и накопление повторных деформаций осуществляется за счет составляющей осадки, происходящей без повышения напряжения.

Цель работы – обоснование закономерностей накопления повторных осадок почвы при воздействии на нее многоосных ходовых систем машинно-тракторных агрегатов.

На процесс слеодообразования многоосными ходовыми системами влияют как реологические факторы, так и явления, связанные с переукладкой частиц почвы при повторных нагружениях. Определим закономерность нарастания осадки деформатора при повторных нагружениях почвы. Для этого случая применим зависимость Больцмана, применявшуюся при исследовании деформаций почв и грунтов Г. И. Покровским, Н. А. Наседкиным и Ю. Л. Мотылевым [6–8].

Согласно зависимости Больцмана, энтропия процесса S пропорциональна логарифму вероятности данного состояния W (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). При повторных деформациях вероятность W данного состояния увеличивается с ростом числа нагружений n . Тогда зависимость Больцмана примет такой вид:

$$S = c_1 \cdot \ln n + c_2, \quad (1)$$

где c_1 и c_2 – постоянные величины.

С другой стороны, энтропия процесса деформации почвы пропорциональна совершаемой при этом работе A_n [6]:

$$S = cA_n$$

(c – коэффициент пропорциональности).

Работа деформации почвы состоит из работы упругой деформации и работы необратимой деформации. Работа внешних сил, затраченная на упругую деформацию почвы, накапливается

в ней за счет преобразования кинетической энергии в потенциальную. Эта энергия возвращается при восстановлении упругой деформации.

Энергия, затрачиваемая на необратимую деформацию почвы, не накапливается в ней, а полностью рассеивается, превращаясь во внутреннюю энергию хаотического (теплового) движения частиц. Внутренняя энергия почвы E может быть представлена в следующем виде [9]:

$$E = F + \Theta S,$$

где F – свободная энергия, Дж; Θ – абсолютная температура, К; S – энтропия, Дж/К.

Свободная энергия F может быть превращена во внешнюю работу при обратимом изотермическом процессе. Связанная энергия ΘS может быть получена лишь в виде тепла. Энтропия системы является мерой связанной энергии и возрастает только в результате необратимых процессов.

Для определения удельной работы A_n , найдем значение определенного интеграла:

$$A_n = \int_0^{h_n} \sigma(h) dh, \quad (2)$$

где h_n – деформация почвы после n нагружений, м; $\sigma(h)$ – функциональная зависимость между напряжением σ и деформацией почвы h .

Из исследований [6, 10, 11] известно, что зависимость $\sigma(h)$ при повторных нагружениях непрерывной является только для упрочняющихся почв. Особенностью упрочняющихся почв является то, что деформация их при каждом последующем нагружении сопровождается повышением напряжения в зоне контакта по сравнению с предыдущим. Это объясняется увеличением интенсивности нагружения при повторных деформациях, в частности из-за уменьшения площади контакта колес с почвой при повторных проходах по следу. На рис. 1 показан график зависимости напряжения от деформации при повторных нагружениях связных упрочняющихся почв с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами.

Для связных почв с одинаковыми по глубине свойствами зависимость $\sigma(h)$ подчиняется функции гиперболического тангенса [12]:

$$\sigma = p_0 th \left(\frac{k}{p_0} h \right), \quad (3)$$

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

Подставив зависимость (3) в подынтегральное выражение (2) и решив его, получим

$$A_n = \frac{p_0^2}{k} \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right).$$

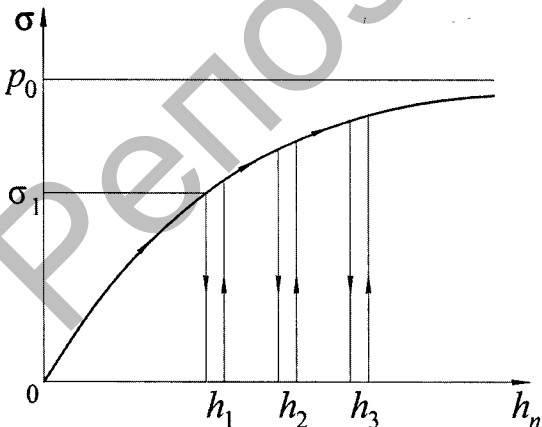


Рис. 1. Закономерности накопления повторных осадок для упрочняющихся связных почв под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 1. Regularities of accumulation repeated a deposit for the strengthened coherent soils under the influence of multiaxis running system

Тогда энтропия процесса деформации почвы выразится уравнением

$$S = c \frac{p_0^2}{k} \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right). \quad (4)$$

После приравнивания правых частей формул (1) и (4) и некоторых преобразований получим, что

$$c_1 \ln n + \ln c_3 = c \frac{p_0^2}{k} \ln ch \left(\frac{k}{p_0} h \right)$$

($\ln c_3 = c_2$).

• Потенцируем правую и левую части последнего уравнения и приравняем выражения, стоящие под знаками логарифмов:

$$c_3 n^{c_1} = \left(ch \left(\frac{k}{p_0} h \right) \right)^{c p_0^2 / k}$$

Отсюда

$$ch\left(\frac{k}{p_0}h\right) = c_3^{k/(cp_0^2)} n^{(c_1/c)(k/p_0^2)}. \quad (5)$$

Обозначив

$$c_3^{k/(cp_0^2)} = a; \quad \frac{c_1}{c} = b;$$

уравнение (5) запишем в следующем виде:

$$ch\left(\frac{k}{p_0}h\right) = an^{\frac{b \cdot k}{p_0^2}},$$

Откуда

$$h = \frac{p_0}{k} \text{Arch}\left(an^{\frac{b \cdot k}{p_0^2}}\right). \quad (6)$$

Коэффициент a найдем из условия, что величина деформации при первом нагружении определится из зависимости (3):

$$h_1 = \frac{p_0}{k} \text{Arth}\left(\frac{\sigma_1}{p_0}\right), \quad (7)$$

где σ_1 – напряжение в контакте деформатора с почвой при первом нагружении.

При первом нагружении ($n = 1$) формула (6) примет такой вид:

$$h_1 = \frac{p_0}{k} \text{Arch}(a). \quad (8)$$

Приравняв правые части формул (7) и (8), находим

$$\text{Arch}(a) = \text{Arth}\left(\frac{\sigma_1}{p_0}\right). \quad (9)$$

Из преобразований обратных гиперболических функций известно, что

$$\text{Arch}(a) = \text{Arth}\left(\frac{\sqrt{a^2 - 1}}{a}\right). \quad (10)$$

Из зависимостей (9) и (10) находим

$$\frac{\sqrt{a^2 - 1}}{a} = \frac{\sigma_1}{p_0}.$$

Отсюда

$$a = \frac{1}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}}.$$

Подставив значение a в формулу (6), найдем зависимость накопления повторных осадок для связных почв с одинаковыми по глубине свойствами:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \text{Arch}\left(\frac{n^{\frac{b \cdot k}{p_0^2}}}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}}\right). \quad (11)$$

Найдем зависимость между сопротивлением и осадкой слабо упрочняющихся почв. К таким почвам относятся суглинистые и глинистые почвы высокой влажности. Характер процесса деформации слабо упрочняющихся почв показан на рис. 2.

При повторных нагружениях слабо упрочняющихся почв с одинаковой по глубине плотностью рост напряжения от цикла к циклу незначительный, а нарастание осадки штампа весьма ощутимо (рис. 2). Нарастание осадки деформатора на таких почвах при повторных нагружениях подчиняется следующей зависимости [13, 14]:

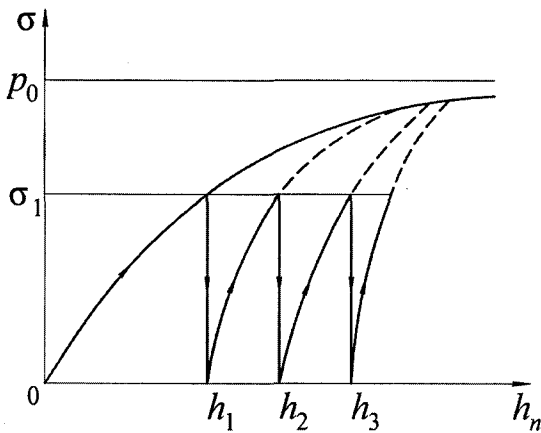


Рис. 2. Закономерности накопления повторных осадок для слабо упрочняющихся почв под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 2. Regularities of accumulation repeated a deposit for poorly strengthened soils under the influence of multiaxis running system

В соответствии с этим будут изменяться коэффициенты p_0 и k . Снижение сопротивления происходит в том случае, если при первом нагружении структура почвы разрушается (особенно, когда верхние слои почвогрунта прочнее нижележащих). Несущая способность и коэффициент объемного смятия при этом уменьшаются [15].

Сопротивление повторным деформациям влажных почв возрастает лишь в начале процесса каждого последующего нагружения. Когда давление будет приближаться к величине несущей способности, различие между сопротивлениями почвы при первом приложении нагрузки и последующих нагружениях исчезнет. Поэтому можно принять, что несущая способность слабо упрочняющихся почв не зависит от количества нагружений. Увеличение сопротивления в начальный период каждого повторного нагружения будем учитывать изменением коэффициента объемного смятия, который зависит от характера протекания процесса деформации в начальный период. Назовем его условным коэффициентом объемного смятия при n -м нагружении – k_{yn} . Тогда зависимость между напряжением и деформацией при n -м нагружении запишется следующим образом:

$$\sigma_n = p_0 t h \left(\frac{k_{yn}}{p_0} \Delta h_n \right),$$

где Δh_n – приращение осадки при n -м цикле, м.

Условный коэффициент объемного смятия равен

$$k_{yn} = \frac{k}{k_u \lg(n/(n-1))}. \quad (14)$$

Зависимость между напряжением и деформацией при n -м нагружении имеет такой вид:

$$\sigma_n = p_0 t h \left(\frac{k}{p_0 k_u \lg(n/(n-1))} \Delta h_n \right). \quad (15)$$

С целью исследования влияния свойств почвы и характера нагружения колес были проведены экспериментальные исследования в почвенном канале. Экспериментальная установка состояла из четырех колес 5.00–10, движущихся по следу друг за другом (рис. 3). При проведении экспериментальных исследований на модели многоосной ходовой системы напряжения и осадку почвы определяли с помощью месдоз и индукционного слеодомера (рис. 4).

$$h_n = h_1(1 + k_u \lg n), \quad (12)$$

где k_u – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Подставив вместо h_1 значение этой величины (7), получим такую зависимость:

$$h_n = \frac{p_0}{k} (1 + k_u \lg n) \text{Arth} \left(\frac{\sigma}{p_0} \right). \quad (13)$$

Зависимость между напряжением и повторными деформациями описывается кусочно-непрерывной функцией. Функция $\sigma = f(h)$ при каждом повторном нагружении подчиняется зависимости гиперболического тангенса. Рассмотрим, чему равны при этом константы p_0 и k . Сопротивление почвы при повторных нагружениях может уменьшаться или увеличиваться по сравнению с первым приложением нагрузки в зависимости от физико-механических свойств почвы и величины давления на нее. В соот-

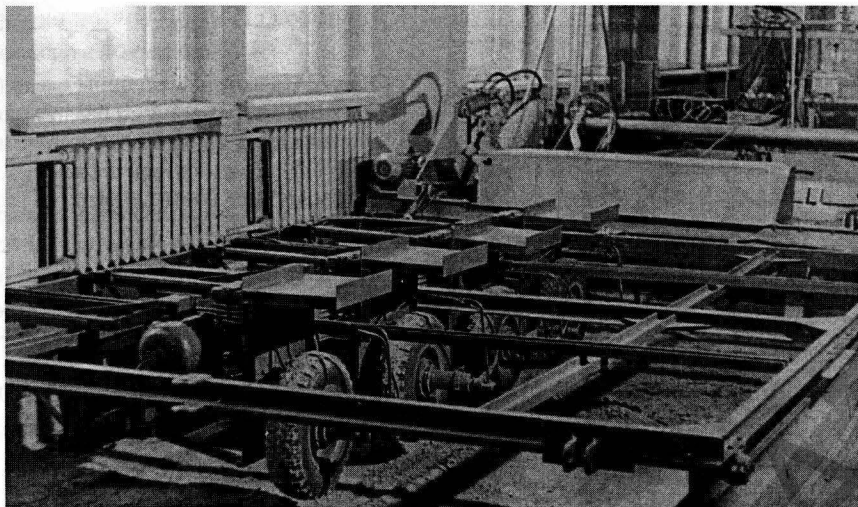


Рис. 3. Физическая модель многоосной ходовой системы
 Fig. 3. Physical model of multiaxis running system

При проведении опытов на дерново-подзолистой супесчаной почве малой влажности ($W = 7,1\%$) установлено, что нарастание глубины следа сопровождается увеличением контактных напряжений (рис. 5).

Для описания процесса слеодообразования на таких почвах хорошо подходит зависимость (11). Расчеты, проведенные на основании нее, показывают, что осадка колес при повторных проходах осуществляется лишь за счет повышения контактных напряжений.

Таким образом, у сильно упрочняющихся почв след формируется и стабилизируется после первого прохода колеса. При последующих проходах колес по следу приращение осадки незначительное. На таких почвах рекомендуется применять многоосные ходовые системы, так как сопротивление качению при последующих проходах будет снижаться.

На суглинистой почве с влажностью $W = 17,2\%$ повторные деформации происходили без повышения напряжений в контакте колес с почвой (рис. 6). Для таких почв зависимость (13) накопления повторных деформаций хорошо согласуется с опытными данными.

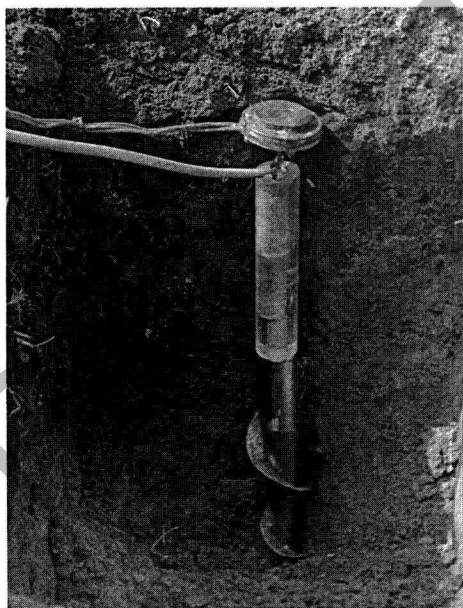


Рис. 4. Прибор для одновременного замера напряжений и осадки почвы под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 4. The device for simultaneous measurement of tension and rainfall of the soil under influence of multiaxis running system



Рис. 5. Нарастание глубины следа (кривая 1) и контактных напряжений (кривая 2) для сильно упрочняющейся почвы под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 5. Increase of depth of a trace (curve 1) and contact tension (curve 2) for strongly strengthened soil under the influence of multi-axis running system

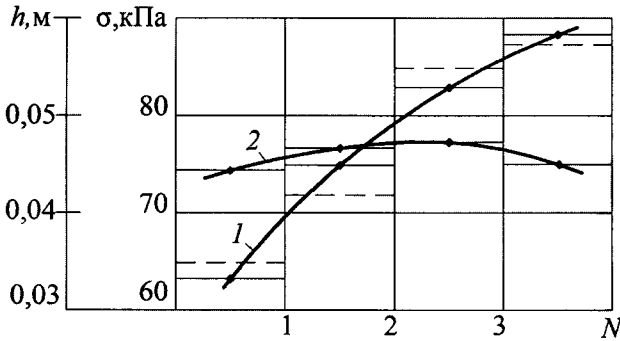


Рис. 6. Нарастание глубины следа (кривая 1) и контактных напряжений (кривая 2) для слабо упрочняющейся почвы под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 6. Increase of depth of a trace (curve 1) and contact tension (curve 2) for poorly strengthened soil under the influence of multiaxis running system

У слабо упрочняющихся почв период стабилизации осадки больше, чем у сильно упрочняющихся почв. При последующих проходах колес по следу нарастание осадки весьма ощутимо, поэтому для таких почв рекомендуется применять движители, у которых колеса не перемещаются по следу предыдущих опор.

Экспериментальные исследования показали, что предложенные зависимости накопления вторичных осадок (11) и (13) не отражают всего многообразия почвенных условий.

Рассмотрим, происходит ли осадка колеса при последующих проходах лишь от повышения напряжения в контакте колеса с почвой или имеет место и деформация, которую нельзя объяснить повышением напряжения. На рис. 7 приведены экспериментальные данные давления колес и осадка при каждом проходе. Осадка колеса, осуществленная за счет повышения контактного напряжения, находилась из зависимости (11). Предел несущей способности и коэффициент объемного смятия определяли по результатам опытов от прохода единичного колеса: $p_0 = 500$ кПа, $k = 2700$ кН/м³.

Из результатов эксперимента видно, что не вся глубина следа осуществлялась за счет повышения контактных напряжений. Анализ показал, что в общем случае деформация почвы равна

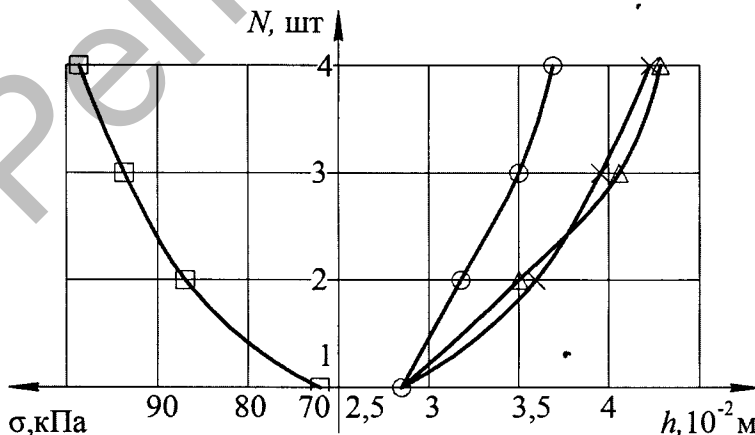
$$h_n = \frac{p_0}{k} \left[\text{Arch} \left(\frac{n^{\frac{b}{k}}}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}} \right) + \text{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right) k_u \lg n \right]. \tag{16}$$

В данном уравнении первое слагаемое правой части представляет собой осадку, развиваемую за счет повышения напряжения; второе – осадку без повышения напряжения.

Для определения коэффициентов b и k_u уравнение (16) представим в таком виде:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \left[\text{Arth} \left(\frac{\sigma_n}{p_0} \right) + \text{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right) k_u \lg n \right], \tag{17}$$

где σ_n – напряжение после n циклов, Па.



□ – развиваемые напряжения; ○ – осадка от повышения напряжений; × – полная осадка; Δ – теоретическая зависимость
□ – the developed tension; ○ – draft from increase in tension; × – full draft; Δ – theoretical dependence

Рис. 7. Нарастание напряжений и осадки при повторных деформациях почвы под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 7. Increase of tension and draft at repeated deformations of the soil under the influence of multiaxis running system

Из анализа уравнений (16) и (17) следует:

$$\text{Arth} \left(\frac{\sigma_n}{p_0} \right) = \text{Arch} \left(\frac{n^{\frac{b \cdot k}{p_0^2}}}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}} \right). \tag{18}$$

Выражение (18) представим следующим образом:

$$\left(\frac{n^{\frac{b \cdot k}{p_0^2}}}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}} \right) = \text{ch} \left(\text{Arth} \frac{\sigma_n}{p_0} \right). \tag{19}$$

Прологарифмируем выражение (19):

$$b \frac{k}{p_0^2} \lg n - \frac{1}{2} \lg \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{p_0^2} \right) = \lg \text{ch} \left(\text{Arth} \frac{\sigma_n}{p_0} \right).$$

Отсюда

$$b = \frac{p_0^2}{k \lg n} \left[\lg \text{ch} \left(\text{Arth} \frac{\sigma_n}{p_0} \right) + \frac{1}{2} \lg \left(1 - \frac{\sigma_1^2}{p_0^2} \right) \right]. \tag{20}$$

Из уравнения (16):

$$k_u = \frac{\left(\frac{k}{p_0} \right) h_n - \text{Arth} \left(\frac{\sigma_n}{p_0} \right)}{\lg n \text{Arth} \left(\frac{\sigma_1}{p_0} \right)}. \tag{21}$$

Для случая деформирования почвы, проиллюстрированного на рис. 7, $b = 0,57$; $k_u = 0,36$.

Проанализируем, как происходит накопление повторных деформаций в зависимости от величины давления колес на почву. Из рис. 8, построенного на основании зависимости (11), видно, что у сильно упрочняющихся почв интенсивность накопления повторных деформаций снижается с увеличением отношения давления к пределу несущей способности почвы.

В общем случае у почв накопление повторных деформаций при небольших удельных нагрузках происходит в основном за счет составляющей от повышения напряжений. При увеличении отношения давления к несущей способности почвы доля этой составляющей падает и накопление повторных деформаций осуществляется за счет составляющей осадки, происходящей без повышения напряжения (рис. 9). Этот анализ сделан на основании зависимости (16).

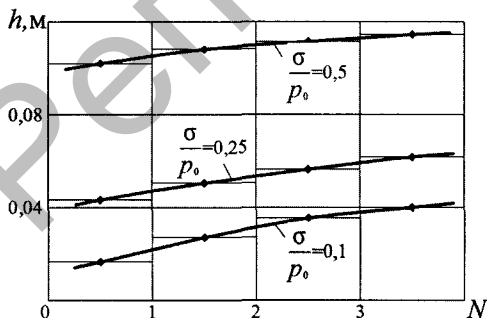
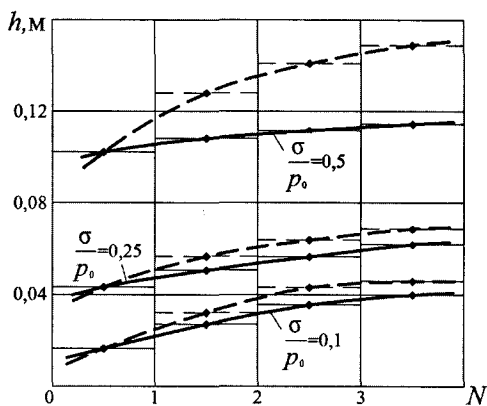


Рис. 8. Накопление повторных деформаций сильно упрочняющейся почвы под воздействием многоосной ходовой системы

Fig. 8. Accumulation of repeated deformations of strongly strengthened soil under the influence of multiaxis running system



— — составляющая осадки от повышения напряжения; - - - - составляющая осадки, происходящей без повышения напряжения

Рис. 9. Накопление повторных деформаций почвы под воздействием многоосной ходовой системы

— — the making draft from increase in tension; - - - - the making draft, occurring without increase in tension

Fig. 9. Accumulation of repeated deformations of the soil under the influence of multiaxis running system

Выводы

1. Для определения закономерностей накопления повторных осадков применена зависимость Больцмана, связывающая энтропию процесса и вероятность данного состояния (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). Полученные закономерности (11), (17), (19) и (22) позволяют определить деформацию почвы в зависимости от различных режимов работы и параметров ходовых систем МТА, а также физико-механических свойств почвы.

2. У сильно упрочняющихся почв интенсивность накопления повторных деформаций снижается с увеличением отношения давления к пределу несущей способности почвы.

3. В общем случае у почв накопление повторных деформаций при небольших удельных нагрузках происходит в основном за счет составляющей от повышения напряжений. При увеличении отношения давления к несущей способности почвы доля этой составляющей падает и накопление повторных деформаций осуществляется за счет составляющей осадки, происходящей без повышения напряжения.

Список использованных источников

1. Русанов, В.А. Проблема переуплотнения почв движителями и эффективные пути ее решения / В.А. Русанов. – М.: ВИМ, 1998. – 368 с.
2. Романюк, Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Н.Н. Романюк. – Минск, 2008. – 206 л.
3. Влияние почвенных условий на формирование машинно-тракторных агрегатов / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2006. – №1. – С. 7–11.
4. Афанасьев, Н.И. Влияние уплотнения машинно-тракторными агрегатами на свойства, режимы почвы и урожай сельскохозяйственных культур: дерново-подзолистые почвы Белоруссии / Н.И. Афанасьев, И.И. Подобедов, А.Н. Орда // Переуплотнение пахотных почв: причины, следствия, пути уменьшения. – М., 1987. – С. 46–59.
5. Кушнарев, А.С. Проблемы повышения плодородия почв / А.С. Кушнарев // Техника в сел. хоз-ве. – 1989. – №1. – С. 4–7.
6. Орда, А.Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.20.03 / А.Н. Орда. – Минск, 1997. – 269 л.
7. Закономерности уплотнения почвы под воздействием колес сельскохозяйственных машин / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2016. – №2. – С. 2–8.
8. Влияние количества осей ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа / И.Н. Шило [и др.] // Тракторы и сельхозмашины. – 2016. – №4. – С. 37–42.
9. Вядов, С.С. Реологические основы механики грунтов / С.С. Вядов. – Минск: Высшая школа, 1978. – 448 с.
10. Беккер, М.Г. Введение в теорию систем местность – машина / М.Г. Беккер. – М.: Машиностроение, 1973. – 520 с.
11. Агейкин, Я.С. Проходимость автомобилей / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1981. – 232 с.
12. Кацыгин, В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий / В.В. Кацыгин // Вопросы с.-х. механики. – Минск: Ураджай, 1964. – Т. 13. – С. 5–147.
13. Закономерности накопления повторных осадков почвы при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники / И.Н. Шило [и др.] // Агропанорама. – 2014. – №6. – С. 2–7.
14. Перспективные мобильные энергетические средства для сельскохозяйственного производства / В.В. Кацыгин [и др.]; под общ. ред. В.В. Кацыгина. – Минск: Наука и техника, 1982. – 272 с.
15. Агейкин, Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители / Я.С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972. – 184 с.

References

1. Rusanov, V.A. (1998) *Problema pereuplotneniya pochv dvizhiteleyami i effektivnye puti ee resheniya* [Soil compaction problem propellers and efficient ways to solve], VIM, Moscow, RU
2. Romanyuk, N.N. (2008) “Reducing the impact on soil sealing vertical loads vibrodynamic pneumatic wheel propulsion”, Abstract of Ph.D. dissertation, Technologies and means of mechanization of agriculture, Minsk, BY
3. Shilo, I. N., Orda, A. N., Gireiko, N. A., Seleshi, A. B. (2006) “Influence of soil conditions on the formation of the machine and tractor units”, *Agropanorama* [Agropanorama], no. 1, pp. 7–11.
4. Afanas'ev, N. I., Podobedov, I. I., Orda, A. N. (1987) “Effect of sealing machine and tractor units on the property regimes of the soil and agricultural crops: Sod-podzolic soils of Belarus”, *Pereuplotnenie pakhotnykh pochv: Prichiny, sledstviya, puti umen'sheniya* [Compaction of arable soils: causes, consequences, ways of reducing the], Nauka, Moscow, RU, pp. 46–59.
5. Kushnarev, A. S. (1989) “Problems of improving soil fertility”, *Tekhnika v sel'skom khozyaistve* [Technology in Agriculture], no. 1, pp. 4–7.
6. Orda, A. N. (1997) “Environmental and energy bases of formation of the machine and tractor units”, Abstract of D. Sc. Dissertation, Technologies and maintenance service means in agriculture, Minsk, BY

7. Shilo, I. N., Romanyuk, N. N., Orda, A. N., Shklyarevich, V. A., Vorobei, A. S. (2016) "Patterns of soil compaction under the influence of agricultural machinery wheels", *Agropanorama* [Agropanorama], no. 2, pp. 2–8.
8. Shilo, I. N., Orda, A. N., Romanyuk, N. N., Nukeshev, S. O., Kushnir, V. G. (2016) "Influence of the number of axes running mobile agricultural machinery systems on the track depth", *Traktory i sel'khoz mashiny* [Tractors and farm machinery], no. 4, pp. 37–42.
9. Vyadov, S. S. (1978) *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological basics of soil mechanics], Vysshaya shkola, Minsk, BY
10. Bekker, M. G. (1973) *Vvedenie v teoriyu sistem mestnost' – mashina* [Introduction to the area of systems – car], Mashinostroenie, Moscow, RU
11. Ageikin, Ya. S. (1981) *Prokhozimost' avtomobilei* [Car patency], Mashinostroenie, Moscow, RU
12. Katsygin, V. V. (1964) "Basic theory of selecting optimal parameters of mobile agricultural machinery and implements", *Voprosy sel'skokhozyaystvennoy mekhaniki mekhaniki* [Questions agricultural mechanics Mechanics], Uradzhai, Minsk, By, vol. 13, pp. 5–147.
13. Shilo, I. N., Romanyuk, N. N., Orda, A. N., Shklyarevich, V. A., Vorobei, A. S. (2014) "Laws of accumulation of sediment re-running of the soil under the influence of mobile agricultural machinery systems", *Agropanorama* [Agropanorama], no. 6, pp. 2–7.
14. Katsygin, V. V. [i dr.] (1982) *Perspektivnye mobil'nye energeticheskie sredstva dlya sel'skokhozyaystvennogo proizvodstva* [Future mobile energy means for agricultural production], in V. V. Katsygin (ed.), Nauka i tekhnika, Minsk, BY
15. Ageikin, Ya. S. (1972) *Vezdekhodnye kolesnye i kombinirovannye dvizhiteli* [ATV wheels and dual propellers], Mashinostroenie, Moscow, RU

Информация об авторах

Шило Иван Николаевич – доктор технических наук, профессор, ректор университета, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bgatu@gmail.com

Романюк Николай Николаевич – кандидат технических наук, доцент, первый проректор, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bgatu@gmail.com

Орда Александр Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: ordaan@tut.by

Шкляревич Виктор Александрович – магистрант, старший преподаватель, Белорусский государственный аграрный технический университет (пр. Независимости, 99, 220023, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bgatu@gmail.com

Воробей Александр Сергеевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Научно-практический центр НАН Беларуси по механизации сельского хозяйства (ул. Кнорина, 1, 200007, Минск, Республика Беларусь). E-mail: belagromech@tut.by

Для цитирования

Закономерности слеодообразования при взаимодействии с почвой многоосной ходовой системы машинно-тракторных агрегатов / И.Н. Шило [и др.] // Вес. Нац. акад. навук. Беларусі. Сер. аграр. навук. – 2016. – № 4. – С. 108–117.

Information about the author

Shilo Ivan N. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Belarus). E-mail: bgatu@gmail.com

Romanyuk Nikolai N. – Doctor of Philosophy (Engineering), Assistant Professor, the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Belarus). E-mail: bgatu@gmail.com

Orda Alexander N. – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Belarus). E-mail: ordaan@tut.by

Shkliarevich Victor A. – Postgraduate student, the Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Belarus). E-mail: bgatu@gmail.com

Vorobei Alexander S. – Doctor of Philosophy (Engineering), the Scientific and Practical Center of the NAS of Belarus on Agriculture Mechanization (Minsk, Belarus). E-mail: belagromech@tut.by

For citation

Shilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N., Shkliarevich V.A., Vorobei A.S. Rules of trace formation at contact of multi-axis running system of machine and tractor units with soil. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus, agrarian series*, 2016, no 4, pp. 108–117.