

Влияние распределения нагрузки по осям машинно-тракторных агрегатов на глубину следа

Иван Николаевич Шило, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь;

Николай Николаевич Романюк, кандидат технических наук, доцент, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь, e-mail: romanyuk-nik@tut.by;

Александр Николаевич Орда, доктор технических наук, профессор, Белорусский государственный аграрный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь);

Саяхат Оразович Нукешев, доктор технических наук, профессор, Казахский агротехнический университет им. С. Сейфуллина, г. Астана, Республика Казахстан

При выполнении различных сельскохозяйственных операций площадь, покрываемая колесами машинно-тракторных агрегатов (МТА), при движении превышает площадь самого поля. (*Цель исследования*) Обосновать закономерности накопления повторных осадок почвы и влияние характера распределения нагрузки по осям машинно-тракторных агрегатов на глубину следа колеса. (*Материалы и методы*) Разработали математический аппарат для описания влияния явлений, связанных с переукладкой частиц почвы при повторных ее нагружениях. Переуплотненные участки почвы создают повышенное сопротивление при последующих ее обработках, что влечет перерасход топлива и снижение производительности МТА. Разрушенная структура почвы полностью не восстанавливается, в результате чего интенсивно обрабатываемый пахотный слой с течением времени деградирует, что ведет к нарушению экологии агроландшафтов. Провели экспериментальные лабораторные исследования влияния свойств почвы и характера нагружения колес на глубину следа. Определили, что закономерности накопления повторных осадок подчиняются зависимости Больцмана, связывающей энтропию процесса и вероятность данного состояния (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). Получили зависимости для определения деформации почвы с разными физико-механическими свойствами при различных режимах нагружения ходовых систем машинно-тракторных агрегатов. Рассчитали, что распределение нагрузки по осям ходовой системы влияет на глубину следа. (*Результаты и обсуждение*) Вывели зависимость для описания процесса слеодообразования на дерново-подзолистой супесчаной почве малой влажности (7,1 процента), отвечающую результатам экспериментов. Провели расчеты на основании полученной зависимости, когда осадка колес при повторных проходах осуществляется лишь за счет повышения контактных напряжений. (*Выводы*) Определили закономерность нарастания осадки почвы от деформатора при повторных нагружениях. Выявили, что полученные закономерности позволяют найти степень деформации почвы в зависимости от различных режимов работы и параметров ходовых систем МТА на различных типах почвогрунта.

Ключевые слова: ходовая система, деформация почвы, распределение нагрузки по осям, машинно-тракторный агрегат, глубина следа, контактные напряжения.

■ **Для цитирования:** Шило И.Н., Романюк Н.Н., Орда А.Н. и др. Влияние распределения нагрузки по осям машинно-тракторных агрегатов на глубину следа // *Сельскохозяйственные машины и технологии*. 2018. Т. 12. №2. С. 38-43. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-38-43

The Influence of Axle Load Distribution of Machine-Tractor Aggregates on the Dip of the Wheel-Track

Ivan N. Shyla, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

Nikolai N. Ramaniuk, PhD. (Eng.), Associate Professor, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

Aleksandr N. Orda, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus;

Sayakhat O. Nukeshev, Dr. Sci. (Eng.), Professor, S.Seifullin Kazakh Agro Technical University, Astana, Republic of Kazakhstan



It is defined that while doing some agricultural operations the area covered by the machine-tractor aggregates wheels exceeds the area of the field. (*Purpose of research*) The regularity of repeated accumulation of the soil puddling and the influence of the specificity of axle load distribution of machine-tractor aggregates on the dip of the wheel-track is justified. (*Materials and methods*) The mathematical apparatus to describe the influence of the effects connected with the soil particles reposition while the repeated loading is developed. The over consolidated soil creates some raised resistance while the following tillage which results in increased fuel consumption and lost productivity of machine-tractor aggregates. The modified soil structure is difficult to be restored entirely. As a result the intensive worked tilth top soil degrades with time which creates the ecosystem disbalance of cultivated land. The laboratory experiments of the soil features influence and the specificity of wheel loading on the dip of the wheel-track are performed. The regularity of repeated puddling accumulation being subject to Boltzman correlation which links the process entropy and the probability of this state (statistical interpretation of the principle of entropy increase) is set. (*Results and discussion*) The dependences to determine the deformation of soil with various physical and mechanical properties under different drive system loading conditions of machine-tractor aggregates are obtained. The influence of axle load distribution on the dip of the wheel-track is established. The dependence to describe the process of wheel track formation on the sod-podzolic sandy loam soil of low moisture level which corresponds to the empirical data is obtained. The calculations from the dependence obtained are performed. While doing repeated passes the wheel sinkage is provided only by the increase of contact stresses. (*Conclusions*) The regularity of the soil puddling rise from the deformer while the repeated loading is set. The regularity obtained makes possible to define the soil deformation depending on the different operating conditions and the drive system parameters of machine-tractor aggregates on different types of soil.

Keywords: Drive system, Deformation of soil, Axle load distribution, Machine-tractor aggregate, Dip of the wheel-track, Contact stresses.

For citation: Shilo I.N., Romanyuk N.N., Orda A.N. etc. The Influence of load distribution on the axles of tractor units to a depth of a trace. *Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii*. 2018. Vol. 12; 2: 38-43. DOI 10.22314/2073-7599-2018-12-2-38-43 (In Russian).

Уплотнение почвы под воздействием ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) ведет к снижению урожайности сельскохозяйственных культур. Так, в следах тракторов урожайность зерновых снижается на 10-15%, а корнеклубнеплодов – на 20-30%. Повышение плотности почвы, вызванное воздействием движителей тракторов и сельскохозяйственных машин, привело к увеличению твердости пахотного слоя в 2-3 раза, из-за чего удельное сопротивление почвы при пахоте повысилось после прохода тракторов на 15-65%, а после транспортных средств и комбайнов – на 60-90% [1-3].

В результате техногенного воздействия ходовых систем МТА на почву происходит ее деформация, на интенсивность которой влияют режим эксплуатации техники, физико-механические свойства почвы (влажность, состав, тип и др.), специфика агрофона, сезонный период в году.

Цель исследования – обоснование закономерностей накопления повторных осадков почвы и определение влияния характера распределения нагрузки по осям машинно-тракторных агрегатов на глубину следа колеса; определение условий, при которых глубина следа будет наименьшей.

Материалы и методы. На процесс слеодообразования многоосными ходовыми системами влияют как реологические факторы, так и факторы, связанные с переукладкой частиц почвы при ее повторных нагружениях.

С помощью экспериментальной модели многоосной ходовой системы провели опыты на разных

типах слабо и сильно упрочняющихся почв (дерново-подзолистая супесчаная, суглинистая) для исследования формирования колесного следа и воздействия его на уплотнение почвенного грунта.

Результаты и обсуждение. Теоретическое обоснование и физико-математические основы расчетов. Энтропия процесса деформации почвы пропорциональна логарифму вероятности данного состояния (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). При повторных деформациях вероятность данного состояния увеличивается с ростом числа нагружений n , величину которых удобно рассчитать, используя зависимость Больцмана ($S = c_1 \ln n + c_2$, где c_1 и c_2 – величины постоянные).

Энтропия процесса деформации почвы пропорциональна совершаемой при этом работе A_n ($S = c A_n$, где c – коэффициент пропорциональности) [4].

Работа деформации почвы состоит из суммы работ упругой и необратимой деформаций. 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.

Внутреннюю энергию почвы E представим как сумму свободной F и связанной энергий: $E = F + TS$ (где T – абсолютная температура, K ; S – энтропия

процесса деформации почвы, Дж/К) [4]. Свободная энергия F может быть превращена во внешнюю работу при обратимом изотермическом процессе. Связанная энергия TS может быть получена лишь в виде тепла. Энтропия системы служит мерой связанной энергии и возрастает только при необратимых процессах. Для вычисления удельной работы A_n найдем значение определенного интеграла:

$$A_n = \int_0^{h_n} \sigma(h) dh, \quad (1)$$

где h_n – глубина деформации почвы после n нагружений, м; $\sigma(h)$ – функциональная зависимость между напряжением σ (Па) и глубиной деформации почвы h (м).

Эксперименты показали, что зависимость при повторных нагружениях сохраняет непрерывность только для сильно упрочняющихся почв [5].

На рисунке 1 показан график зависимости напряжения от деформации почвы при повторных нагружениях сильно упрочняющихся почв.

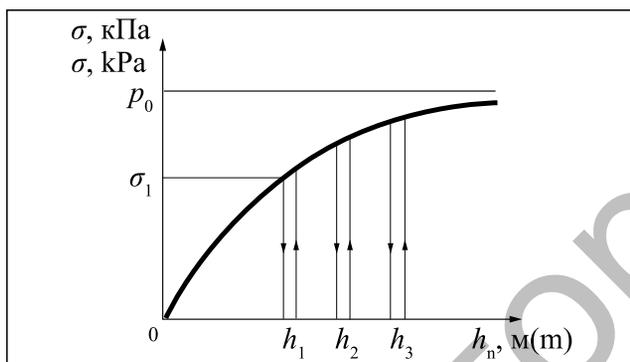


Рис. 1. График зависимости напряжения σ от деформации h для сильно упрочняющихся почв: h_1, h_2, h_3, h_n – глубина деформации почвы при (1, 2, 3...n) – нагружениях, м; p_0 – предел прочности почвы, кПа; σ_1 – напряжение почвы при первом нагружении, кПа

Fig. 1. The dependency diagram of the stress σ from the deformation h for high work-hardening soil: h_1, h_2, h_3, h_n – deformation dip of the soil while (1, 2, 3...n) wheel loading, m; p_0 – ultimate bearing soil stress, kPa; σ_1 – soil stress while the first wheel loading, kPa

Особенность деформации сильно упрочняющихся почв состоит в том, что при каждом последующем их нагружении повышается напряжение в зоне контакта с колесом по сравнению с предыдущим. Это сопровождается увеличением интенсивности нагружения при повторных деформациях, в частности из-за уменьшения площади контакта колеса с почвой при повторном проходе по следу.

Зависимость между напряжением и осадкой подчиняется функции гиперболического тангенса [6]:

$$\sigma = p_0 th \left(\frac{k}{p_0} h \right), \quad (2)$$

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

Подставив зависимость (2) в подинтегральное выражение (1):

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

получаем формулу энтропии процесса деформации почвы:

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

После преобразования вышеперечисленных выражений выведем закономерность накопления повторных осадок для сильно упрочняющихся почв:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arch} \left(\frac{n^{\frac{k}{2p_0}}}{\sqrt{1 - \sigma_1^2 / p_0^2}} \right), \quad (3)$$

где σ_1 – напряжение почвы при первом нагружении, кПа.

Найдем зависимость между сопротивлением и осадкой слабо упрочняющихся почв (суглинистые и глинистые высокой влажности). Характер процесса деформации слабо упрочняющихся почв показан на рисунке 2.

При повторных нагружениях слабо упрочняющихся почв с одинаковой по глубине плотностью рост напряжения от цикла к циклу незначителен, а нарастание глубины следа колеса весьма ощутимо. Нарастание глубины следа на таких почвах при повторных нагружениях деформатором подчиня-

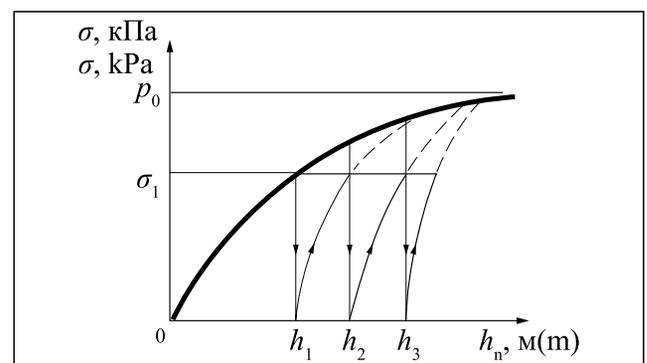


Рис. 2. График зависимости напряжения от деформации слабо упрочняющихся почв

Fig. 2. The dependency diagram of the stress from the deformation for low work-hardening soil

ется зависимости, выраженной как $h_n = h_1(1 + k_n \ln n)$ (где k_n – коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации) [7].

Преобразовав данную зависимость и выражение (2), выведем закономерность нарастания глубины следа для слабо упрочняющихся почв:



$$h_n = \frac{p_0}{k} (1 + k_u \lg n) \text{Arch} \left(\frac{\sigma}{p_0} \right). \quad (4)$$

Зависимость между напряжением и повторными деформациями для слабо упрочняющихся почв может быть выражена кусочно-непрерывной функцией $\sigma = f(h)$, которая при каждом повторном нагружении подчиняется зависимости гиперболического тангенса.

Рассмотрим, чему равны при этом константы p_0 и k .

Сопrotивление повторным деформациям влажных почв возрастает лишь в начале каждого последующего нагружения. Когда давление будет приближаться к величине несущей способности почвы, различие сопротивлений 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 почвенного слоя в начале каждого его повторного нагружения примем как коэффициент объемного смятия почвенного слоя, или условный коэффициент объемного смятия при n -м нагружении, который зависит от интенсивности начальной деформации почвы. Выразим зависимость между напряжением и деформацией почвенного слоя при n -м нагружении:

$$\sigma_n = p_0 th \left(\frac{k_{yn}}{p_0} \Delta h_n \right), \quad (5)$$

где Δh_n – приращение осадки при n -м цикле (м). Рассчитаем k_{yn} – условный коэффициент объемного смятия

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

Представим зависимость между напряжением и деформацией при n -м нагружении как:

$$\sigma_n = p_0 th \left(\frac{k}{p_0 k_u \lg(n/(n-1))} \Delta h_n \right). \quad (6)$$

Описание эксперимента и расчет нарастания осадки почвы при повторных нагружениях ее деформатором. Для выявления влияния свойств почвы и характера нагружения колес на глубину следа проведены экспериментальные исследования в почвенном канале на разных типах почвенного грунта.

При проведении исследований с использованием модельной установки многоосной ходовой системы (рис. 3) напряжение и осадку почвы определяли с помощью мездоз и индукционного следемера.

При проведении опытов на дерново-подзолистой супесчаной почве малой влажности ($W=7,1\%$) установлено, что с нарастанием глубины следа увеличиваются значения контактных напряжений (рис. 4). Для расчетов процесса следеобразования на почвах указанного типа рекомендуется приве-

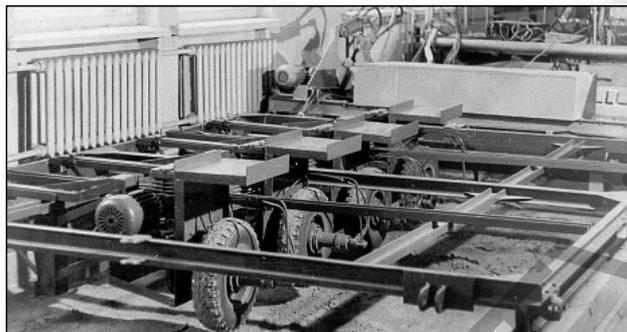


Рис. 3. Экспериментальная модель многоосной ходовой системы

Fig. 3. The experiment model of multi-axis drive system

денное выше выражение (3). При повторных проходах осадка колес происходит только за счет повышения контактных напряжений.

На суглинистой почве (влажность $W = 17,2\%$) повторные деформации не влияли на повышение напряжений в контакте колеса МТА с почвой (рис. 5). Для такого типа почв зависимость накопления повторных деформаций (4) хорошо согласуется с опытными данными.

Изучая образование ходовыми системами МТА в почве следов, необходимо учитывать коэффициент неравномерной нагрузки по осям, обусловленный закономерностью нарастания деформации почвы при повторных воздействиях различной по величине нагрузкой.

Для исследования влияния повторных проходов колес на деформацию почвы при различном распределении нагрузки по осям воспользуемся предпосылками [8-10]. При нарастании повторной нагрузки до предшествующей ей величины осадка колеса будет такой же, как и при повторном деформировании одинаковой нагрузкой.

Дальнейший рост повторной нагрузки вызывает деформацию более глубоких слоев почв; при этом осадка будет либо такой же, как и при первом нагружении, либо несколько меньшей из-за уплотнения верхнего слоя почвы. Уменьшение воздействия

оценивают коэффициентом $k_L = 1 - \left(\frac{q_i}{q_{i+1}} \right)^{n'}$,

где q_i и q_{i+1} – величина давлений при i -м и $(i+1)$ -м нагружениях, Па; ($n' = 2$ – коэффициент, полученный в результате проведения эксперимента) [8].

Тогда зависимость глубины осадки h_2 от давлений колес двухосного хода на сильно упрочняющихся почвах равна:

$$h_2 = \frac{p_0}{k} \text{Arch} \frac{2^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - q_1^2/p_0^2}} + \frac{p_0}{k} \left(\text{Arch} \frac{q_2}{p_0} - \text{Arch} \frac{q_1}{p_0} \right) k_L. \quad (7)$$

Первый член правой части зависимости (7) включает осадку от прохода первого колеса и приращение осадки от второго колеса при достижении им

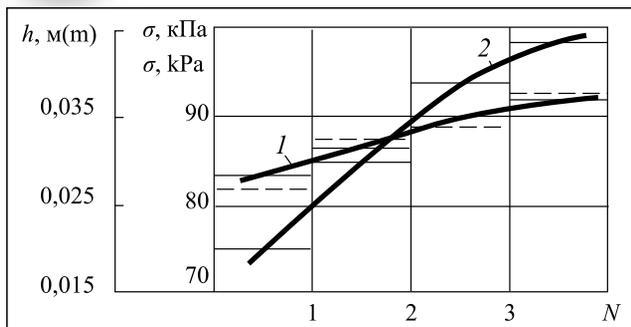


Рис. 4. Нарастание глубины следа и контактных напряжений под воздействием многоосной ходовой системы для сильно упрочняющейся почвы: 1 – глубина следа h , м; 2 – контактные напряжения σ , кПа; — теоретическая зависимость; - - - экспериментальная зависимость

Fig. 4. The rise of the dip of the wheel-track and the contact stresses with a multi-axis drive system for high work-hardening soil: 1- wheel-track dip, h , m; 2 – contact stresses σ , kPa; —theoretical dependence; - - - experimental dependence

давления, развиваемого первым колесом, а второй член равен дополнительной осадке от прохода второго колеса за счет повышения давления по сравнению с первым проходом.

При каждом последующем нарастающем нагружении дополнительная осадка будет равна:

$$\Delta h_n = \frac{p_0}{k} \left[\text{Arch} \frac{n^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - q_{n-1}^2/p_0^2}} - \text{Arch} \frac{(n-1)^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - q_{n-1}^2/p_0^2}} \right] + \frac{p_0}{k} \left(\text{Arch} \frac{q_n}{p_0} - \text{Arch} \frac{q_{n-1}}{p_0} \right) k_L, \quad (8)$$

где q_{n-1} и q_n – давление колес на почву при $(n-1)$ -м и n -м нагружениях соответственно, Па.

Первый член правой части зависимости (8) равен приращению осадки от повторного прохода при достижении давлением величины предыдущего нагружения, а второй член представляет собой дополнительную осадку от увеличения давления при последующем нагружении.

С учетом зависимостей (7) и (8) деформация сильно упрочняющейся почвы при возрастании последующих нагрузок n -осного колесного хода будет равна:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \left[\text{Arch} \frac{2^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - \frac{q_1^2}{p_0^2}}} + \sum_{i=3}^n \left(\text{Arch} \frac{i^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - \frac{q_{i-1}^2}{p_0^2}}} - \text{Arch} \frac{(i-1)^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - \frac{q_{i-1}^2}{p_0^2}}} \right) + \sum_{i=2}^n \left(\text{Arch} \frac{q_i}{p_0} - \text{Arch} \frac{q_{i-1}}{p_0} \right) k_L \right]. \quad (9)$$

При убывании нагрузки от прохода к проходу глубина следа сильно упрочняющейся почвы опре-

делится величиной давления, развиваемого при первом проходе. При небольшом различии давлений $q_1, q_2 \dots q_n$ глубина следа определяется по формуле:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \text{Arch} \left(\frac{n^{b(k/p_0^2)}}{\sqrt{1 - q_{cp}^2/p_0^2}} \right), \quad (10)$$

где q_{cp} – среднее давление колес на почву, Па.

На рисунке 6 приведен график зависимости изменения глубины следа от величины давления и распределения давления по осям для сильно упрочняющейся почвы ($p_0=500$ кПа, $k=2500$ кН/м³, $n'=2$). При оценке влияния распределения давлений по колесам рассмотрен случай, когда нарастание или убывание

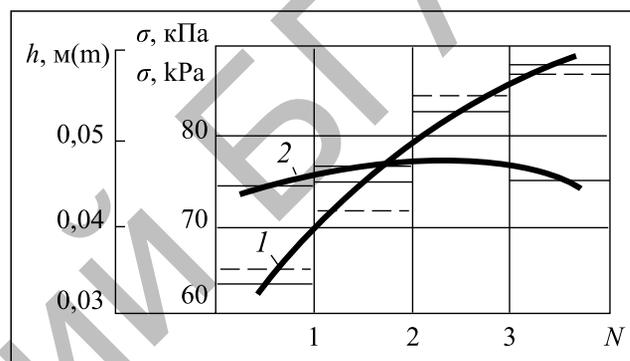


Рис. 5. Нарастание глубины следа (1) и контактных напряжений (2) для слабо упрочняющейся почвы под воздействием многоосной ходовой системы; — теоретическая зависимость; - - - экспериментальная зависимость

Fig. 5. The dependency of the changing of the wheel-track (1) dip from the pressure quantity (2) and the axis pressure distribution; — theoretical dependence; - - - experimental dependence

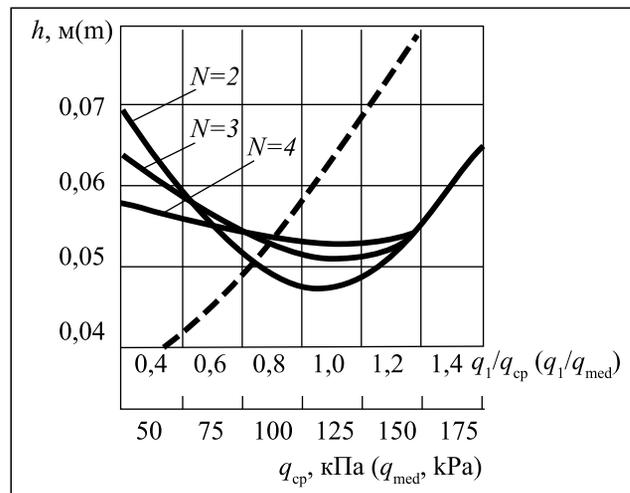


Рис. 6. Зависимость изменения глубины следа от величины давления и распределения давления по осям: -- от величины давления; — от распределения давления по колесам;

Fig. 6. The changing of the dip of the wheel-track from the pressure quantity and the axis pressure distribution: -- from the pressure; — from the wheel pressure distribution



давления происходит по линейному закону.

Из рисунка 6 следует, что влияние давления колеса на глубину следа весьма существенно. Зависимость деформации почвы от распределения давления по осям имеет минимум при отношении $q_1/q_{ср}$, близком к 1. Для слабо упрочняющихся почв теоретически и экспериментально получено, что наименьшая глубина следа наблюдается также при равномерном распределении нагрузки по осям.

Выводы. Для определения закономерностей накопления повторных осадок применена зависи-

мость Больцмана, связывающая энтропию процесса и вероятность данного состояния (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). Полученные закономерности позволяют определить деформацию почвы в зависимости от различных режимов работы и параметров ходовых систем МТА на различных типах почв. Экспериментальное исследование показало, что наименьшая глубина следа наблюдается при равномерном распределении нагрузки по осям ходовой системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кушнарев А.С., Кочев В.И. Механико-технологические основы обработки почвы. Киев: Урожай, 1989. 144 с.
2. 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.
3. Романюк Н.Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2008. 206 с.
4. Шило И.Н., Орда А.Н., Романюк Н.Н., Нукушев 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. Вялов С. С. Реологические основы механики грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.
6. Кацыгин В.В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и

орудий // *Вопросы сельскохозяйственной механики*. Минск: Ураджай, 1964. Т. 13. С. 5-147.

7. 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.
8. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители. М.: Машиностроение, 1972. 198 с.
9. Измайлов А.Ю., Кряжков В.М., Антышев Н.М., Елизаров В.П., Лобачевский Я.П., Сорокин Н.Т., Гурылев Г.С., Савельев Г.С., Сизов О.А., Шевцов В.Г. Концепция модернизации сельскохозяйственных тракторов и тракторного парка России на период до 2020 года. М.: 2012. 56 с.
10. Lobachevskii Y., Godzhaev Z., Shevtsov V., Lavrov A., Sizov O., Merzlyakov A. Harmonizing power categories and towing categories of agricultural tractors with series of preferred numbers. SAE Technical Papers. 2017. T. 2017-January. N January. 18-24.

REFERENCES

1. Kushnarev A.S., Kochev V.I. Mekhaniko-tekhnologicheskiye osnovy obrabotki pochvy. Kiev: Urozhay, 1989: 144. (In Russian).
2. Shyla I.M., Ramaniuk M.M., Orda A.M., Nukeshev S.O., Shklyarevich V.A., Varabey A.S. Zakonomernosti uplotneniya pochvy pod vozdeystviyem koles sel'skokhozyaystvennykh mashin // *Agropanorama*. 2016; 2: 2-8. (In Russian).
3. Ramaniuk M.M. Snizheniye uplotnyayushchego vozdeystviya na pochvu vertikal'nymi vibrodinamicheskimi nagruzkami pnevmokolesnykh dvizhiteley: Dis.... kand. tekhn. nauk. Minsk, 2008: 206. (In Russian).
4. Shyla I.M., Orda A.M., Ramaniuk M.M., Nukeshev S.O., Kushnir V.G. Vliyaniye kolichestva osey khodovykh sistem mobil'noy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki na glubinu sleda // *Traktory i sel'khomashiny*. 2016; 4: 37-42. (In Russian).
5. Vyalov S.S. Reologicheskiye osnovy mekhaniki gruntov. M.: Vyssh. shkola, 1978: 447. (In Russian).
6. Katsygin V.V. Osnovy teorii vybora optimal'nykh parametrov mobil'nykh sel'skokhozyaystvennykh mashin i

orudiy // *Voprosy sel'skokhozyaystvennoy mekhaniki*. Minsk: Uradzhay, 1964; 13: 5-147. (In Russian).

7. Shyla I.M., Ramaniuk M.M., Orda A.M., Shklyarevich V.A. Zakonomernosti nakopleniya povtornykh osadok pochvy pri vozdeystvii khodovykh sistem mobil'noy sel'skokhozyaystvennoy tekhniki // *Agropanorama*. 2014; 6: 2-7. (In Russian).
8. Ageykin Ya.S. Vezdekhodnyye kolesnyye i kombinirovannyye dvizhiteli. M.: Mashinostroyeniye, 1972: 198. (In Russian).
9. Izmailov A.Yu., Kryazhkov V.M., Antyshev N.M., Elizarov V.P., Lobachevsky Ya.P., Sorokin N.T., Gurylev G.S., Savel'yev G.S., Sizov O.A., Shevtsov V.G. Concept of modernization of agricultural tractors and tractor fleet of Russia for the period up to 2020. M.: 2012. 56. (In Russian).
10. Lobachevskii Y., Godzhaev Z., Shevtsov V., Lavrov A., Sizov O., Merzlyakov A. Harmonizing power categories and towing categories of agricultural tractors with series of preferred numbers. SAE Technical Papers. 2017. 2017-January. January: 18-24. (In Russian).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.