

## Влияние количества осей ходовой системы мобильной сельскохозяйственной техники на глубину следа

### Influence of the number of undercarriage axles of mobile agricultural machinery on the depth of track

И. Н. ШИЛО<sup>1</sup>, д-р техн. наук

А. Н. ОРДА<sup>1</sup>, д-р техн. наук

Н. Н. РОМАНИУК<sup>1</sup>, канд. техн. наук

С. О. НУКЕШЕВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук

В. Г. КУШНИР<sup>3</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск, Республика Беларусь, romanyuk@tut.by

<sup>2</sup> Казахский агротехнический университет имени С. Сейфуллина, Астана, Республика Казахстан, nukeshhev@mail.ru

<sup>3</sup> Костанайский государственный университет имени А. Байтурсынова, Костанай, Республика Казахстан, valkush@mail.ru

I. N. SHILO<sup>1</sup>, DSc in Engineering

A. N. ORDA<sup>1</sup>, DSc in Engineering

N. N. ROMANYUK<sup>1</sup>, PhD in Engineering

S. O. NUKESHEV<sup>2</sup>, DSc in Engineering

V. G. KUSHNIR<sup>3</sup>, DSc in Engineering

<sup>1</sup> Belarusian State Agrarian Technical University, Minsk, Republic of Belarus, romanyuk@tut.by

<sup>2</sup> S. Seifullin Kazakh Agrotechnical University, Astana, Republic of Kazakhstan, nukeshhev@mail.ru

<sup>3</sup> A. Baytursynov Kostanay State University, Kostanay, Republic of Kazakhstan, valkush@mail.ru

Ухудшение свойств почвы вследствие многократного воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов 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. Для прогнозирования показателей воздействия на почву ходовых систем с учетом типа и состояния почвенного агрофона, а также для определения перспективных путей улучшения конструкций ходовых систем и повышения их агроэкологических свойств необходимо обоснование закономерностей накопления повторных осадков почвы при воздействии ходовых систем. Необходимо определить закономерность нарастания осадки деформатора при повторных нагружениях почвы. Деформация почв 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. Для определения закономерностей накопления повторных осадков применена зависимость Больцмана, связывающая энтропию процесса и вероятность данного состояния. Получены зависимости, которые позволяют определить деформацию почв с разными физико-механическими свойствами при различных режимах работы и параметрах ходовых систем машинно-тракторных агрегатов. Для сильно упрочняющихся почв глубина следа уменьшается при увеличении количества осей ходовой системы. Для слабо упрочняющихся влажных почв для уменьшения глубины следа рекомендуется применять движители с большей шириной колес.

**Ключевые слова:** почва; глубина; ось; ходовая система; уплотнение; свойства; зависимость; колесо.

The deterioration of soil properties as a result of repeated impact of undercarriage of tractor units leads to the reduction in crop yields. Increasing of soil density caused by the impact of movers of tractors and agricultural machines results in increase of soil hardness by 2–3 times. To forecast the indices of undercarriage impact on soil taking into account the type and condition of soil fertility, as well as to determine the promising ways of improvement of undercarriages' designs and their agro-ecological characteristics, it is necessary to substantiate the regularities of accumulation of repeated soil settlements under the impact of undercarriage. It is also necessary to determine the regularity of rise of settlement deformer under repeated soil load. The deformation at each subsequent soil loading is followed by stress rise in the contact zone as compared to the previous one. This is due to the increase in load intensity under repeated deformations, in particular due to the reduction of contact area of wheels with soil during repeated passing of tracks. This paper observes some dependencies which allow to determine the deformation of soils with different physical and mechanical properties under various operating conditions and parameters of undercarriages of tractor units. For the soil with high degree of compaction, the depth of track should be reduced by increasing the number of axles of undercarriage. For the moist soil with low degree of compaction, the movers with larger width of wheels should be used to reduce the depth of track.

**Keywords:** soil; depth; axle; undercarriage; compaction; properties; dependency; wheel.

#### Введение

Ухудшение свойств почвы вследствие многократного воздействия ходовых систем машинно-тракторных агрегатов (МТА) ведет к снижению урожайности с.-х. культур. Так, урожайность зерновых культур в следах тракторов снижается на 10–15 %, а корнеклубнеплодов — на 20–30 %. Суммарная площадь следов движи-

телей МТА почти в 2 раза превышает площадь обрабатываемой поверхности; 10–12 % площади поля подвергается воздействию ходовых систем от 6 до 20 раз, 65–80 % — от 1 до 6 раз и только 10–15 % свободны от такого воздействия [1, 2].

Повышение плотности почвы, вызванное воздействием движителей тракторов и сельхозмашин, привело 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 %, после транспортных средств и комбайнов — на 60–90 % [1].

Происходящий в результате воздействия ходовых систем МТА 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.

### Цель исследования

Для прогнозирования показателей воздействия на почву ходовых систем с учетом типа и состояния почвенного агрофона, а также для определения перспективных путей улучшения конструкций ходовых систем и повышения их агроэкологических свойств необходимо обоснование закономерностей накопления повторных осадков почвы при воздействии ходовых систем.

### Материалы и методы

На процесс слеодообразования при воздействии на почву многоосных ходовых систем влияют как реологические факторы (время запаздывания деформации, период релаксации), так и не изучаемые в реологии явления, связанные с переукладкой частиц почвы при повторных нагружениях. Определим закономерность нарастания осадки деформатора при повторных нагружениях почвы. В данном случае можно применить зависимость Больцмана, успешно применявшуюся при исследованиях деформации почв и грунтов Г. И. Покровским, Н. А. Наседкиным и Ю. Л. Мотылевым [1].

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 вид:

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

где  $c_1, c_2$  — постоянные величины.

С другой стороны, энтропия процесса деформации почвы пропорциональна совершаемой при этом работе  $A_n$  [3]:

$$S = c A_n,$$

где  $c$  — 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 (теплого) движения частиц. Внутренняя энергия почвы  $E$  может быть представлена в виде [3]:

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

где  $F$  — свободная энергия, Дж;  $\Theta$  — абсолютная температура, К;  $S$  — энтропия, Дж/К.

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

Для определения удельной работы  $A_n$  найдем значение 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  $\sigma$  и деформацией почвы  $h$ .

### Результаты и их обсуждение

Эксперименты [1] показали, что зависимость  $\sigma(h)$  при повторных нагружениях непрерывна только для упрочняющихся почв. Характер деформации таких почв во времени показан на рис. 1, а.

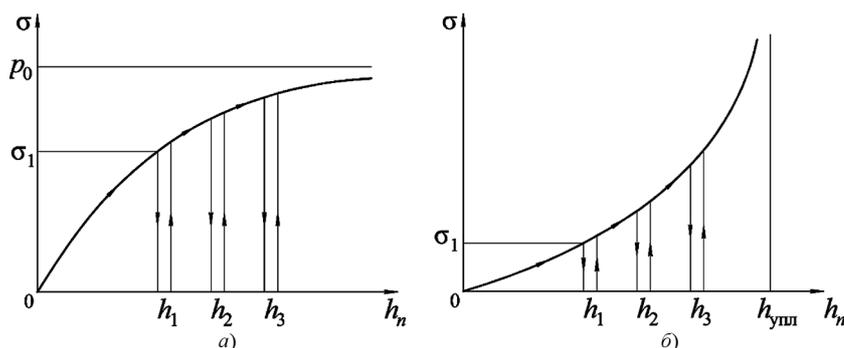


Рис. 1. Закономерности накопления повторных осадков для упрочняющихся почв:

а — связные почвы; б — почвы, подготовленные под посев

Особенность упрочняющихся почв состоит в том, что их деформация 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, а показан график зависимости напряжения от деформации при повторных нагружениях связанных упрочняющихся почв с одинаковыми по глубине физико-механическими свойствами, а на рис. 1, б — рыхлых почв с плотным подстилаемым основанием.

Для связанных почв с одинаковыми по глубине свойствами зависимость  $\sigma(h)$  подчиняется функции гиперболического тангенса [4]:

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

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

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

$$A_n = \frac{p_0^2}{k} \operatorname{lnch} \left( \frac{k}{p_0} h \right). \quad (4)$$

Тогда энтропию процесса деформации почвы выразим уравнением:

$$S = c \frac{p_0^2}{k} \operatorname{lnch} \left( \frac{k}{p_0} h \right). \quad (5)$$

Приравняем правые части формул (1) и (5):

$$c_1 \ln n + c_2 = c \frac{p_0^2}{k} \operatorname{lnch} \left( \frac{k}{p_0} h \right),$$

где  $n$  — число нагружений (количество осей ходовых систем).

Преобразуем выражение к виду:

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

где  $\ln c_3 = c_2$ .

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

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

Отсюда

$$\operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} h \right) = c_3^{k / (c p_0^2)} n^{(c_1 / c) (k / p_0^2)}. \quad (6)$$

Обозначив

$$c_3^{k / (c p_0^2)} = a'; \quad \frac{c_1}{c} = b'; \quad b' \frac{k}{2} = B,$$

уравнение (6) запишем в виде:

$$\operatorname{ch} \left( \frac{k}{p_0} h \right) = a' n^B,$$

откуда

$$h = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arch}(a' n^B). \quad (7)$$

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

$$h_1 = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arch} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right), \quad (8)$$

где  $\sigma_1$  — напряжение в контакте деформатора с почвой при первом нагружении, Па.

При первом нагружении ( $n = 1$ ) формула (7) примет вид:

$$h_1 = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arch}(a'). \quad (9)$$

Приравняв правые части формул (8) и (9), найдем:

$$\operatorname{Arch}(a') = \operatorname{Arch} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right).$$

Из преобразований обратных гиперболических функций известно, что:

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

Из зависимостей (9) и (10) найдем:

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

откуда

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

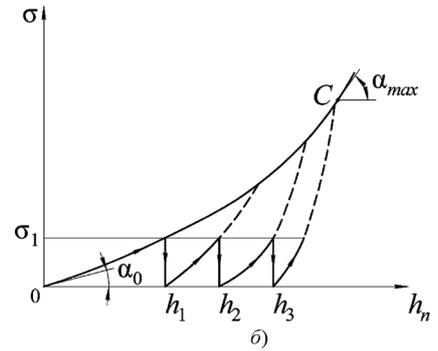
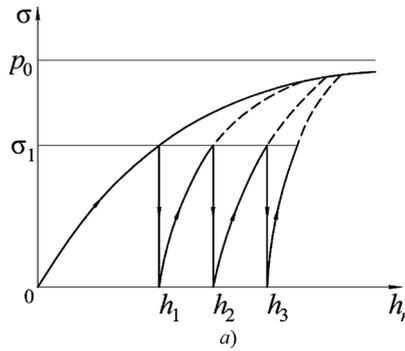


Рис. 2. Закономерности накопления повторных осадок для слабо упрочняющихся почв:

*a* — связные почвы; *б* — почвы, подготовленные под посев

Подставив значение  $a'$  в формулу (4), найдем зависимость накопления повторных осадок для связных почв с одинаковыми по глубине свойствами:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arch} \left( \frac{n^B}{\sqrt{1 - \sigma^2 / p^2}} \right), \quad (11)$$

где  $B$  — коэффициент накопления повторных осадок связных почв.

Применим зависимость Больцмана для определения закономерности нарастания деформации от повторных нагружений для рыхлых почв, подстилаемых плотным основанием (см. рис. 1, б). Для таких почв зависимость между напряжением и деформацией определяется по формуле:

$$\sigma = \frac{a}{b} \operatorname{tg}(abh); \quad (12)$$

$$a = \sqrt{k_0};$$

$$b = \frac{\pi}{2} \frac{1}{h_{\text{упл}} \sqrt{k_0}};$$

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

где  $k_0$  — коэффициент объемного смятия почвы в начале деформации, Па/м<sup>3</sup>;  $h_{\text{упл}}$  — предельная величина деформации, м;  $\varepsilon_0$  — коэффициент пористости почвы до нагружения;  $\varepsilon_{\min}$  — минимально возможный коэффициент пористости почвы;  $\nu$  — коэффициент бокового расширения почвы для случая деформирования с ограниченной возможностью расширения.

Значение удельной работы, определяемой по зависимости (2), с учетом формулы (12) будет равно:

$$A_n = -\frac{1}{b^2} \ln |\cos(abh)|.$$

Поскольку энтропия процесса деформации почвы пропорциональна совершаемой работе, то с учетом зависимости (1) получим:

$$c_1 \ln n + c_2 = -\frac{c}{b^2} \ln |\cos(abh_n)|.$$

После преобразований, аналогичных выводу зависимости (11), получим зависимость накопления повторных осадок упрочняющихся почв с плотным подстилаемым основанием [5]:

$$h_n = \frac{1}{ab} \operatorname{Arccos} \left( \frac{n^{-B_1}}{\sqrt{1 + (b^2/a^2)\sigma^2}} \right). \quad (13)$$

При повторных нагружениях слабо упрочняющихся почв с одинаковой по глубине плотностью рост напряжения от цикла к циклу незначителен, а нарастание осадки штампа весьма ощутимо (рис. 2). Нарастание осадки деформатора на таких почвах при повторных нагружениях подчиняется зависимости [6]:

$$h_n = h_1(1 + k_u \lg n), \quad (14)$$

где  $k_u$  — коэффициент интенсивности накопления необратимой деформации.

Подставив вместо  $h_1$  значение этой величины [1], получим зависимость:

$$h_n = \frac{p_0}{k} (1 + k_u \lg n) \operatorname{Arch} \left( \frac{\sigma}{p_0} \right). \quad (15)$$

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 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 нижних). Несущая способность и коэффициент объемного смятия при этом уменьшаются. Увеличение сопротивления характерно для почв низкой влажности, способных к уплотнению и упрочнению структуры. Повторное деформирование в таком случае связано с преодолением сил трения покоя, которые превосходят по величине силы трения скольжения.

У влажных почв, однородных по глубине, силы трения покоя в меньшей степени отличаются от сил трения скольжения, чем у сухих. Поэтому при повторных нагружениях, когда необходимо преодолеть силы трения покоя, сопротивление почвы увеличивается менее заметно, чем в предыдущем случае. К тому же здесь почти не происходит образования уплотненного ядра под деформатором, так как деформация влажных почв характеризуется в основном сдвигом частиц. Сопротивление влажных почв повторным деформациям возрастает лишь в начале процесса каждого последующего нагружения. Когда давление приближается к величине несущей способности, различие между сопротивлениями почвы при первом приложении нагрузки и последующих нагружениях исчезает. 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  $k_{yn}$  объемного смятия при  $n$ -м нагружении. Тогда зависимость между напряжением и деформацией при  $n$ -м нагружении запишем как:

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

где  $\Delta h_n$  — приращение осадки при  $n$ -м цикле, м.

Напряжение  $\sigma_n$  в конце каждого цикла нагружения равно напряжению  $\sigma_1$ , развиваемому в конце первого цикла. Исходя из этого, найдем условный коэффициент объемного смятия:

$$k_{yn} = \frac{p_0}{\Delta h_n} \operatorname{Arth} \left( \frac{\sigma_1}{p_0} \right).$$

Приращение осадки при  $n$ -м приложении нагрузки найдем из уравнения (15):

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

Подставив это выражение в предыдущее, найдем:

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

Зависимость между напряжением и деформацией при  $n$ -м нагружении примет вид:

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

Рассмотрим, как происходит процесс накопления повторных осадок для почвы, подготовленной под посев, подстилаемой плотным основанием высокой влажности (см. рис. 2, б). В данном случае нельзя пренебречь осадкой подстилаемого основания. Величину осадки почвы после  $n$  нагружений определим по зависимостям (13) и (14):

$$h_n = \frac{1}{ab_1} (1 + k_u \lg n) \operatorname{Artg} \left( \frac{b_1}{a} \sigma \right). \quad (16)$$

В начале процесса деформирования характер зависимости  $\sigma = f(h)$  практически не отличается от случая, когда почва подстилается недеформируемым основанием. Следовательно, коэффициент  $a$  определяется согласно зависимости (12). Коэффициент  $b$  найдем из условия, что производная  $\sigma$  по  $h$  в точке  $C$  (см. рис. 2, б) равна максимальному коэффициенту объемного смятия  $k_{\max}$ :

$$\sigma' = a^2 \frac{1}{\cos^2(abh_{\text{упл}})} = k_{\max}.$$

После преобразований с учетом значения коэффициента  $a$  получим:

$$b_1 = \frac{1}{\sqrt{k_0 h_{\text{упл}}}} \operatorname{Arccos} \sqrt{\frac{k_0}{k_{\max}}}.$$

Таким образом, по зависимости (16) можно рассчитать глубину осад-

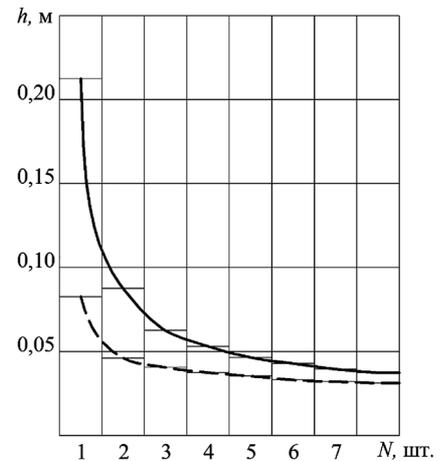


Рис. 3. Зависимость глубины следа сильно упрочняющейся почвы от количества осей:

— при  $\xi Q/F_k p_0 = 0,8$ ; ---- при  $\xi Q/F_k p_0 = 0,4$

ки деформатора для случая, приведенного на рис. 2, б.

Проанализируем, как влияют параметры ходовой системы (давление, количество осей, приходящаяся на ходовую систему нагрузка, размеры колес) на слеодообразование.

В случае изменения давления в зависимости, обратно пропорциональной количеству осей  $N$ , глубину следа для сильно упрочняющихся почв определим по зависимости (11):

$$H_N = \frac{p_0}{k} \operatorname{Arch} \frac{N^{bk/p_0}}{\sqrt{1 - (\xi Q/F_k N p_0)^2}}, \quad (17)$$

где  $\xi$  — коэффициент, учитывающий закономерность распределения давлений под опорной поверхностью колеса.

Из рис. 3, построенного на основании зависимости (17), видно, что при увеличении количества осей многоосной ходовой системы глубина следа уменьшается.

Для слабо упрочняющихся почв эффект уменьшения глубины следа и уплотнения почвы при увеличении количества осей снижается по сравнению со слеодообразованием на сильно упрочняющихся почвах.

Рассмотрим, какое количество осей движителя предпочтительнее по слеодообразованию при одинаковом удельном давлении. В этом случае размеры колес будут увеличиваться при уменьшении количества осей. Отношение диаметра колеса к ширине  $D/B$  примем постоянным. Поскольку диаметры подобных ко-

лес соотносятся между собой, как и длины площадей контакта, то размеры колес  $D$  и  $B$  находятся в следующей зависимости от количества осей:

$$\begin{aligned} D_1 &= \sqrt{N} D_N; & B_1 &= \sqrt{N} B_N; \\ D_{N-1} &= \sqrt{N/(N-1)} D_N; & (18) \\ B_{N-1} &= \sqrt{N/(N-1)} B_N. \end{aligned}$$

Увеличение размеров колеса у ходовых систем при уменьшении количества осей приводит к снижению коэффициента объемного смятия. Коэффициент объемного смятия почвы  $k$ , приведенный к размерам колеса, равен:

$$k = \frac{k'}{100\sqrt{BD}}, \quad (19)$$

где  $k'$  — коэффициент объемного смятия, определяемый с помощью твердометра, Н/м<sup>3</sup>;  $B$ ,  $D$  — размеры колеса, м.

На основании зависимости (19) найдем:

$$\begin{aligned} k' &= 100k_1\sqrt{D_1B_1} = 100k_2\sqrt{D_2B_2} = \\ &= 100k_N\sqrt{D_NB_N}. \end{aligned}$$

Тогда, если при воздействии на почву колес  $N$ -осного движителя коэффициент объемного смятия  $k_N$  известен, для колес одно-, двух- и  $(N-1)$ -осного хода его можно определить по формулам:

$$k_1 = k_N\sqrt{\frac{D_NB_N}{D_1B_1}}; \quad k_2 = k_N\sqrt{\frac{D_NB_N}{D_2B_2}};$$

$$k_{N-1} = k_N\sqrt{\frac{D_NB_N}{D_{N-1}B_{N-1}}};$$

или с учетом равенств (18):

$$k_1 = k_N\sqrt{\frac{1}{N}}; \quad k_n = k_N\sqrt{\frac{n}{N}};$$

$$k_{N-1} = k_N\sqrt{\frac{N-1}{N}}.$$

Подставив эти выражения в формулу (11), получим зависимость глубины следа сильно упрочняющихся почв от количества осей:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \sqrt{\frac{N}{n}} \operatorname{Arch} \left( \frac{n^{b(k_N/p_0^2)\sqrt{n/N}}}{\sqrt{1-q^2/p_0^2}} \right). \quad (20)$$

Подчеркнем, что здесь через  $N$  обозначено максимальное количество

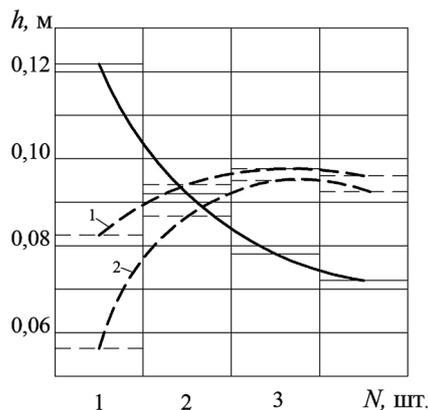


Рис. 4. Нарастание глубины следа при одинаковом давлении:

— — сильно упрочняющаяся почва; ---- — слабо упрочняющаяся почва; 1 — при  $k_u = 2$ ; 2 — при  $k_u = 4$

во осей ходовой системы, а через  $n$  — количество осей сравниваемых систем ( $n$  изменяется от 1 до  $N$ ).

Для слабо упрочняющихся почв глубина следа равна:

$$h_n = \frac{p_0}{k} \sqrt{N/n} \operatorname{Arch} \frac{q}{p_0} (1 + k_u \lg N). \quad (21)$$

Из рис. 4, построенного по зависимостям (20) и (21), видно, что для сильно упрочняющихся почв с целью уменьшения глубины следа целесообразнее увеличивать количество осей ходовой системы, чем размеры колес. Для увлажненных слабо упрочняющихся почв ( $k_u = 2$ ) с целью снижения слеодообразования одинаково эффективны увеличение количества осей и опорной поверхности колес. Для переувлажненных почвогрунтов ( $k_u = 4$ ) эффективно увеличение размеров колес ходовых систем.

#### Выводы

Для определения закономерностей накопления повторных осадков применена зависимость Больцмана, связывающая энтропию процесса и вероятность данного состояния (статистическая интерпретация второго начала термодинамики). Полученные зависимости позволяют определить деформацию почв с разными физико-механическими свойствами при различных режимах работы и параметрах ходовых систем МТА.

Для сильно упрочняющихся почв глубина следа снижается при увеличении количества осей ходовой системы. Для слабо упрочняющихся

ся влажных почв для снижения глубины следа рекомендуется применять движители с большей шириной колес.

#### Литература и источники

1. Орда А. Н. Эколого-энергетические основы формирования машинно-тракторных агрегатов: Дис. ... д-ра техн. наук. Минск, 1997. 269 с.
2. Романюк Н. Н. Снижение уплотняющего воздействия на почву вертикальными вибродинамическими нагрузками пневмоколесных движителей: Дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2008. 206 с.
3. Вядов С. С. Реологические основы механики грунтов. Минск: Высшая школа, 1978. 448 с.
4. Кацыгин В. В. Основы теории выбора оптимальных параметров мобильных сельскохозяйственных машин и орудий // В кн.: Вопросы сельскохозяйственной механики. Минск: Ураджай, 1964. Т. 13. С. 5—147.
5. Шило И. Н., Романюк Н. Н., Орда А. Н. и др. Закономерности накопления повторных осадков при воздействии ходовых систем мобильной сельскохозяйственной техники // Агропанорама. 2014, № 6. С. 2—7.
6. Шило И. Н., Орда А. Н., Гирейко Н. А. и др. Влияние почвенных условий на формирование машинно-тракторных агрегатов // Агропанорама. 2006, № 1. С. 7—11.

#### References

1. Orda A. N. *Ekologo-energeticheskie osnovy formirovaniya mashinno-traktornykh agregatov*. Dis. d-ra tekhn. nauk [Environmental and energy bases of forming of machine-tractor units. DSc in Engineering thesis]. Minsk, 1997, 269 p.
2. Romanyuk N. N. *Snizhenie uplotnyayushchego vozdeystviya na pochvu vertikal'nymi vibrodinamicheskimi nagruzkami pnevmokolesnykh dvizhiteley*. Dis. kand. tekhn. nauk [Reducing the soil compaction by vertical vibrodynamic loads from pneumatic wheel movers. PhD in Engineering thesis]. Minsk, 2008, 206 p.
3. Vyadov S. S. *Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov* [Rheological fundamentals of soil mechanics]. Minsk, Vysshaya shkola Publ., 1978, 448 p.
4. Katsygin V. V. Basic theory of selecting optimal parameters of mobile agricultural machinery and implements. *Voprosy sel'skokhozyaystvennoy mekhaniki* [Issues of agricultural mechanics]. Minsk, Uradzhay Publ., 1964, vol. 13, pp. 5—147 (in Russ.).
5. Shilo I. N., Romanyuk N. N., Orda A. N., Shklyarevich V. A., Vorobey A. S. Laws of accumulation of repeated settlements under the influence of undercarriage of mobile agricultural machinery. *Agropanorama*, 2014, no. 6, pp. 2—7 (in Russ.).
6. Shilo I. N., Orda A. N., Gireyko N. A., Seleshi A. B. Influence of soil conditions on the forming of machine-tractor units. *Agropanorama*, 2006, no. 1, pp. 7—11 (in Russ.).