

УДК 631.3: 631.445.12

### **К ОЦЕНКЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН НА ТОРФЯНО-БОЛОТНЫЕ ПОЧВЫ**

**Я.М. Шупилов**, кандидат технических наук  
Институт мелиорации и луговодства НАН Беларуси

Согласно литературным данным [1], число проходов техники по лугу при многоукосном использовании сеяных трав составляет 6-21 раз за сезон. При уборке трав на зеленый корм, силос или травяную муку суммарное покрытие следами машин площади луга за один укос составляет 51%, при заготовке сенажа – 75, сена – 130%, что приводит, особенно на торфяных почвах, к разрушению дернины, повреждению и гибели трав, снижению долголетия сеяного луга.

При подготовке почвы, посеве, уходе за растениями и уборке урожая суммарная площадь следов движителей техники в 2 раза превышает площадь полевого участка: 10-12% территории подвергаются воздействию техники от 6 до 20 раз, 65-80% – от 1 до 6 раз и только 10-15% поля не подвергаются их воздействию. Установлено, что давление ходовых систем сельскохозяйственной техники на почву не должно превышать 60-150 кПа в зависимости от влажности и типа почвы, условий работы, тогда как современные тракторы и прицепы создают давление до 300 кПа и выше.

#### **Несущая способность торфяной залежи**

Удельное давление на поверхности торфяной залежи, при котором возможна нормальная работа сельскохозяйственной техники, зависит от таких факторов, как вид торфа, его влажность, степень разложения, зольность и др., а для одних и тех же условий – от формы, размеров и физико-механических свойств опорной поверхности. При расчетах взаимодействия ходовых систем механизмов и грунта или почвы основное значение имеет несущая способность, под которой понимают максимальное удельное давление на опорной поверхности, при котором не происходит провала сооружения или машины.

В качестве расчетных обычно рассматривают две модели разрушения грунтовых оснований, предложенные К. Терцаги [2]. Первая модель, модель «общего сдвига», представляет разрушение основания, когда верхний слой грунта сдвигается по нижележащему в результате образования поверхностей скольжения под нагруженным участком. В результате на поверхности образуются валы выпирания. Несущая способность в этом случае определяется методами предельного равновесия и зависит от сопротивления грунта сдвигу. Механическими параметрами модели являются угол внутреннего трения  $\varphi$  и сцепление  $c$ .

Вторая модель К. Терцаги отражает «местный сдвиг», когда штамп погружается глу-

боку в грунт, прорезая его по цилиндрической поверхности. Детальный механизм деформаций в этой модели отсутствует, а предельная нагрузка определяется по той же формуле, что при «общем сдвиге», но значение тангенса угла внутреннего трения  $\operatorname{tg}\varphi$  и сцепление  $c$  грунта уменьшаются на одну треть. Вторая модель более точно отражает работу торфяного основания, так как при деформациях не наблюдается заметных горизонтальных смещений торфа из-под опорной поверхности. Сжимаясь под действием нагрузки, близлежащие к нагруженной поверхности слои торфа прогибаются, а по мере ее увеличения происходит их срез по периметру опорной поверхности. Таким образом, в отличие от песка и частично глин, работающих на сжатие и выпирание, торф работает на сжатие и срез.

Для упомянутых моделей, которые базируются на использовании теории предельного равновесия грунтового массива, можно определить нагрузку  $p_{\text{пр}}$ , при которой основание в целом приходит в состояние предельного равновесия. Дальнейшее даже незначительное увеличение нагрузки вызывает чрезмерные осадки с деформациями сдвига. К сожалению, теория предельного равновесия не позволяет получить интересующую нас допустимую или безопасную нагрузку  $p_{\text{без}}$ . Она устанавливается через  $p_{\text{пр}}$  путем деления ее на коэффициент запаса  $K_{\text{зап}}$ , больший единицы,

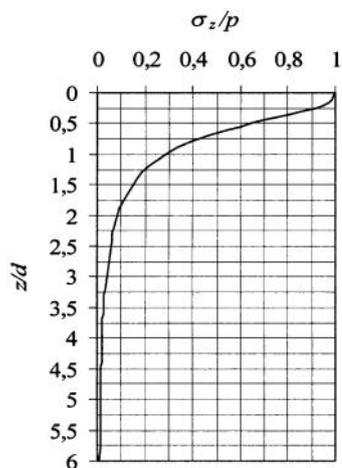
$$p_{\text{без}} = \frac{p_{\text{пр}}}{K_{\text{зап}}}, \quad (1)$$

величину которого в данном случае невозможно обосновать не только строго теоретически, но и логическими соображениями, и он может быть установлен только эмпирическим путем [3]. Поэтому для таких условий значение строгости решения задачи предельного равновесия становится менее значимым.

В этой связи более обоснованным, с нашей точки зрения, является направление в оценке устойчивости торфяного основания, базирующееся на анализе напряженного состояния основания и установлении непосредственно безопасного (или допустимого) напряженного состояния и отвечающей ему величины внешней нагрузки.

Как известно, оценка допустимых давлений на расчетные слои основания и их деформаций проводится на основании анализа напряженного состояния оснований. Возможность применения методов теории упругости при решении вопросов распределения напряжений в минеральных грунтах для большинства исследователей не вызывает сомнений. Некоторые опыты по установлению характера распределения напряжений в торфяных основаниях проводились П.А. Дроздом [4]. Их результаты позволили сделать вывод, что распределение напряжений в торфяной залежи, нагруженной вертикальным давлением, близко к распределению, описываемому уравнениями теории упругости.

Если характер распределения вертикальных сжимающих напряжений на различной глубине торфяного основания в долях от диаметра круглого штампа изобразить в виде эпюры напряжений по его оси, то она будет иметь вид в соответствии с рис. 1.



**Рис. 1. Эюра распределения сжимающих напряжений  $\sigma_z$  в долях от интенсивности вертикальной нагрузки  $p$  под центром круглой площади загрузки в слое залежи**

Безопасную нагрузку определим по формуле, впервые полученной Н.П. Пузыревским и Н.М. Герсевановым [5], придав ей следующий вид:

$$p_{\text{без}} = M_c c + \gamma_3 M_h h_3, \quad (2)$$

$$\text{где } M_c = \frac{\pi}{\operatorname{ctg} \varphi \left( \operatorname{ctg} \varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi \right)};$$

$$M_h = \frac{\pi}{\operatorname{ctg} \varphi - \frac{\pi}{2} + \varphi} + 1;$$

$\gamma_3$  – удельный вес торфа залежи, кН/м<sup>3</sup>;

$h_3$  – толщина слоя торфяной залежи, считая от дневной поверхности, м.

Для случая оценки допустимых давлений, когда расчетные слои близки к дневной поверхности, величина второго члена зависимости (2) мала или вообще равна нулю на поверхности залежи. Величина безопасной нагрузки может также существенно изменяться, прежде всего, за счет возможного подсушивания и увлажнения торфа, а также состояния поверхности торфяной залежи при ее сельскохозяйственном использовании. Так, нарушение структуры торфа может уменьшить величину сцепления торфа до двух раз. Наличие же сеяных трав может существенно ее увеличить, так как высокое сцепление торфов обусловлено не только совместным воздействием капиллярных, молекулярных и коллоидных сил, но и так называемым «структурным сцеплением». Именно этот вид сцепления, обусловленный наличием неразложившихся растительных остатков, является наиболее устойчивым к изменению влажности. Он неодинаков по величине и зависит от травостоя, его густоты и возраста. Следует, очевидно, ожидать, что разница в величинах сцепления торфа при наличии дернины и без нее будет не меньше, чем в торфах, где она может изменяться в пределах 1,3-5,5 раза в зависимости от преобладающего направления структурных волокон [7]. Сцепление, обусловленное капиллярными и молекулярными силами, с возрастанием влажности резко падает.

С учетом упомянутых факторов может быть предложен порядок расчета несущей способности торфяной залежи, используемой под сельскохозяйственные культуры, при воздействии на нее движителей техники. В общем случае она базируется на анализе распределения вертикальных сжимающих напряжений по глубине залежи при увеличении внешней нагрузки на опорную площадь машины (гусеницу или колесо) и непосредственном установлении по формуле (2) безопасного (или допустимого) напряженного состояния, отвечающего этой внешней нагрузке, т.е. должно соблюдаться условие

$$p_{без} \geq \sigma_{z \max}, \quad (3)$$

где  $\sigma_{z \max}$  – максимальные вертикальные сжимающие напряжения (по оси опорной поверхности машины) для расчетного слоя в толще торфяной залежи.

Для однородной по плотности, влажности и прочностным характеристикам залежи достаточно проверки условия (3) на ее поверхности. Это касается и залежи, когда верхний слой разрыхлен и параметры прочности торфа оказались меньше, чем до нарушения структуры. На лугу, где имеется слой дернины, целесообразной может оказаться проверка условия (3) на поверхности залежи с большими величинами сцепления, определяемыми состоянием дернины, и ниже этого слоя. Так как вертикальные сжимающие напряжения по оси штампа интенсивно затухают до глубин, определяемых шириной или диаметром опорной поверхности (рис. 1), то проверка условия (3) практически ограничивается этими глубинами.

Изменения величины сцепления и угла внутреннего трения от влажности торфа, построенные по данным таблицы, приведенной в книге [6], можно видеть на рис. 2, а, б.

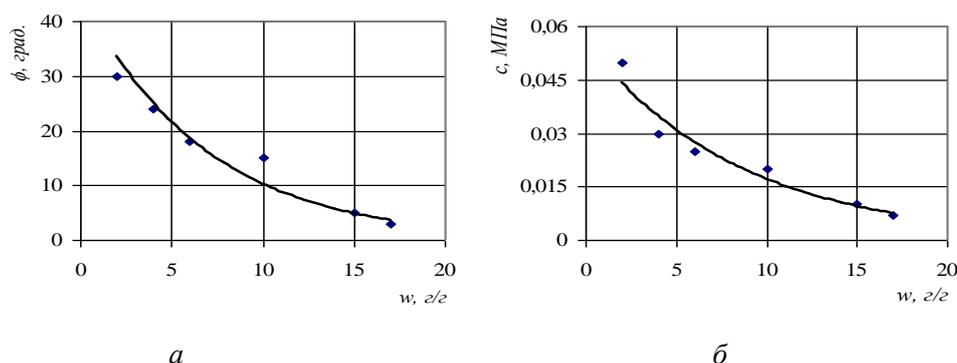


Рис. 2. Изменение угла внутреннего трения (а) и сцепления (б) от влажности торфа

Результаты графической аппроксимации упомянутых данных для угла внутреннего трения ( $\varphi$ , град.) и сцепления ( $c$ , МПа) могут быть представлены экспоненциальными зависимостями

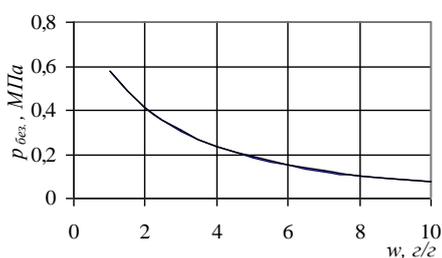
$$\varphi = 45,25 \exp(-0,15w), \quad (4)$$

$$c = 0,056 \exp(-0,12w), \quad (5)$$

где  $w$  – весовая влажность торфа, г/г.

Величины достоверности аппроксимаций, определяемые квадратом коэффициента корреляции  $R^2$ , соответственно составили 0,95 и 0,97.

На основании установленных закономерностей прочностных характеристик торфа от его влажности проведен расчет безопасной или допустимой нагрузки под слоем дернины толщиной 20 см для условий, когда торф близок к полному насыщению водой. По данным вычислений приводится графическая зависимость безопасной нагрузки от влажности торфа (рис. 3).



**Рис. 3. Зависимость безопасной нагрузки от влажности торфа**

при повторных нагрузках П.А. Дрозд [4] считает возможным проводить расчеты по статическим нагрузкам, так как в торфе с естественной и нарушенной структурой статические нагрузки вызывают большие деформации, чем повторные одинаковой величины с равным временем действия.

Зависимость, полученная Буссинеском и Шлейхером для вертикальных упругих деформаций точек полупространства и преобразованная Н.А. Цытовичем [5] к форме осадок, имеет вид

$$s_c = \frac{pd \omega (1 - \nu_0^2)}{E_0}, \quad (6)$$

где  $s_c$  – общая осадка штампа (остаточная и упругая), в пределах линейной зависимости между осадками  $s_c$  и давлением  $p$ ;

$p$  – удельная нагрузка на грунт;

$d$  – ширина прямоугольной площади подошвы или диаметр круглой;

$\omega$  – коэффициент, зависящий как от местоположения точки, осадка которой определяется, так и от формы площади подошвы;

$E_0$  – модуль общей деформации грунта;

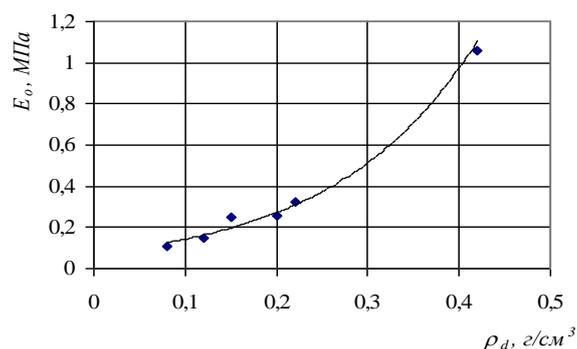
$\nu_0$  – коэффициент бокового расширения грунта.

Формула (5), позволяющая рассчитывать деформации оснований, достаточно проста, но требует при практическом применении определения величин  $E_0$  и  $\nu_0$ . В общем случае деформируемость торфа определяется такими факторами, как влажность, плотность в сухом состоянии, степень разложения, зольность и пр. Их большое разнообразие затрудняет выбор деформационных характеристик и часто вынуждает проводить лабораторные или полевые исследования. Однако в практических расчетах для наиболее распространенных низинных видов торфа пренебрегают влиянием целого ряда факторов и пользуются зависимостями, характеризующими обобщенную связь деформационных характеристик от плотности торфа в сухом состоянии или влажности.

Такой характеристикой, с нашей точки зрения, может явиться плотность торфа в сухом состоянии, которой в большинстве случаев пользуются многие исследователи.

При установлении аналитической зависимости между модулем общей деформации торфа и его плотностью в сухом состоянии воспользуемся инженерно-геологическими особенностями торфа, приведенными в таблице книги [7].

Как и следовало ожидать, с увеличением плотности сухого торфа модуль деформации возрастает в несколько раз, что можно видеть из анализа кривой на рис. 4, построенной по данным таблицы. Кривую можно аппроксимировать в виде экспоненциальной зависимости



**Рис. 4. Зависимость модуля общей деформации торфа от его плотности в сухом состоянии**

$$E_0 = 0,075 \exp(6,42 \rho_d), \quad (7)$$

где  $E_0$  – модуль общей деформации торфа, МПа;

$\rho_d$  – плотность торфа в сухом состоянии, г/см<sup>3</sup>.

Достоверность аппроксимации  $R^2=0,96$ .

Как известно, формула (6) применима в пределах линейной зависимости между осадкой  $s_c$  и давлением  $p$ , нарушение которой приводит к развитию областей пластических деформаций и все большему отклонению от решения на основе модели линейно деформируемого тела. Поэтому в качестве граничного критерия принята величина безопасной нагрузки  $p_{без}$ , определяемая по зависимости (2).

Это положение обосновывается также П.А.Дроздом [4] особым характером разрушения торфа и затуханием скорости деформации торфяной залежи во времени. При кратковременном действии небольших нагрузок деформации почти полностью обратимы и торф работает как упругая среда. При дальнейшем нагружении происходит постепенный срез по периметру штампа и нарушение линейной зависимости между осадкой и нагрузкой. По его мнению, практически можно допускать нагрузки, равные критическим или даже больше их, если общие деформации не превышают допустимых.

Так как величина коэффициента бокового давления покоя  $\xi_0$ , связанная с  $\nu_0$ , остается относительно постоянной характеристикой торфа, не зависящей от влажности, предварительного уплотнения и внешнего давления [7], величину, аналогичную коэффи-

циенту Пуассона и относящуюся к общей деформации грунта  $\nu_0$  (коэффициент бокового или поперечного расширения), также можно считать относительно постоянной характеристикой. Некоторые значения этой величины для различных видов торфов с различной степенью разложения, по данным [7], приведены в таблице.

**Величины коэффициентов бокового расширения торфов**

Вид торфа	Степень разложения, %	Коэффициент бокового расширения
Медиум-торф	10...15	0,36
Пушицево-сфагновый	25	0,34
Сфагновый низинный	25	0,27
Древесно-осоковый	35	0,32

Величина  $s_c$ , определяемая по зависимости (6), соответствует стабилизированной осадке штампа под статической нагрузкой (вследствие ползучести торфа величина осадки непрерывно возрастает). При действии подвижной нагрузки на поверхности торфяной залежи в течение короткого промежутка времени вертикальные сжимающие напряжения возрастают с определенной скоростью от нуля до максимального значения, воздействуя некоторый период времени, а затем падают до нуля.

Для вычисления деформаций торфа от подвижной нагрузки с использованием зависимости (6) воспользуемся выражением, которое позволяет их определять на любой период времени под нагрузкой, не превышающей предел пропорциональности [4]:

$$s = at^n, \quad (8)$$

где  $s$  – полная осадка штампа на заданный период времени;

$a$  – эмпирический коэффициент, численно равный осадке за период  $t=1$ ;  $n=0,016+0,368\rho_d$  – коэффициент, учитывающий интенсивность накопления деформации во времени;

$\rho_d$  – плотность торфа в сухом состоянии в г/см<sup>3</sup>.

Эмпирический коэффициент  $a$  примем равным величине стабилизированной осадки  $s_c$  и будем считать, что она произошла за одни сутки. Это, очевидно, не приведет к существенной погрешности в расчетах, так как разница в определении  $s$  по формуле (8) для одних и 30 суток, когда плотность сухого торфа составляет 0,08-0,19, находится в пределах 14-34%. Поэтому выражение (8) с учетом зависимости (6) будет иметь вид:

$$s = \frac{\rho d \omega (1 - \nu_0^2)}{E_0} t^n. \quad (9)$$

В расчетах также примем, что длительность действия нагрузки  $t$  определяется как отношение базы машины к ее скорости. Для колесного трактора площадь отпечатка заднего колеса может быть приведена к круглому штампу с диаметром  $d$  и удельной нагрузкой, определяемой нагрузкой на колесо согласно [4].

Упругие деформации  $s_y$ , возникающие от прохода по торфяной залежи сельскохо-

зайственных машин, найдем по формуле [4]:

$$s_y = \frac{pd \omega}{E_y}, \quad (10)$$

где  $p$  – удельная нагрузка;

$d$  – диаметр опорной площадки;

$E_y$  – модуль упругости;

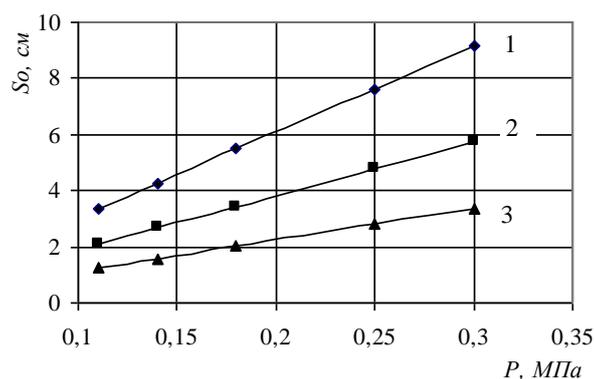
$\omega$  – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние размеров и формы опорной площадки, а также глубины торфяной залежи.

Зависимость модуля упругости торфа естественной структуры  $E_y$ , МПа, от плотности торфа в сухом состоянии  $\rho_d$ , г/см<sup>3</sup> согласно В.Н.Зайцу [4], имеет вид:

$$E_y = 126 \rho_d^{2,355}. \quad (11)$$

Тогда, для определения остаточной деформации  $s_0$  из величины  $s$  в зависимости (9) необходимо вычесть величину  $s_y$  в зависимости (10), т.е.

$$s_0 = s - s_y. \quad (12)$$



**Рис. 5. Результаты вычислений остаточной деформации поверхности залежи для плотности торфа  $\rho_d$ . 1 – 0,15, 2 – 0,2 и 3 – 0,25 г/см<sup>3</sup>**

С использованием зависимости (12) и установленных закономерностей деформационных характеристик торфа от его плотности в сухом состоянии проведен расчет остаточной деформации торфяной залежи мощностью 1,2 м для условий ПОСМЗиЛ от движителей на ее поверхности с расчетным диаметром опорной площадки  $d=30$  см. Некоторые данные вычислений остаточной деформации поверхности залежи  $s_0$  от удельной нагрузки  $p$  для трех значений плотности торфа в сухом состоянии  $\rho_d$  приводятся на рис. 5.

**Литература**

1. Зотов А.А., Щукин Н.Н. Влияние сельскохозяйственной техники на агрофизические показатели торфяно-болотных почв под посевами многолетних трав. //Почвоведение. – 1996. – №12. – С. 1473-1477.
2. Черкасов И.И. Механические свойства грунтов в дорожном строительстве. – М.: Транспорт, 1976. – 248 с.
3. Евгеньев И.Е., Казарновский В.Д. Земляное полотно автомобильных дорог на слабых грунтах. – М.: Транспорт, 1976. – 272 с.
4. Дрозд П.А. Сельскохозяйственные дороги на болотах. – Мн.: Урожай, 1966. – 168 с.
5. Цытович Н.А. Механика грунтов. – М.: Госиздат лит. по стр-ву, архит. и строит. матер., 1963. – 636 с.
6. Винокуров Ф.П., Тетеркин А.Е., Питерман М.А. Строительные свойства торфяных грунтов. – Мн.: Изд-во АН БССР, 1962. – 284 с.
7. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. Грунтоведение. Под ред. Е.М.Сергеева. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 596 с.

**Summary**

***Shupilov Ya. Assesment of action of farm machines on peat-boggy soils***

The theoretical substantiation of determination of bearing strength and deformations of a peat sod field under loads from farm machines is given. In the general case, the procedure of design of bearing strength of a peat sod field used for farm crop cultivation when it is acted machine propulsive devices is based on analysis of vertical compressive stress distribution in depth of long lea under augmentation of an external load from the machine (caterpillar or wheel) and direct determination of safe (or allowable) stressed state adequate this external load. The empirical formulas for determination of strength parameters of peat having natural structure in conditions close to its complete water saturation are obtained. The procedure of analysis of deformations of peat under propulsive devices that enables to determine deformations in any span of time of action of a load is offered.