

УДК 631.41

## **ОЦЕНКА УПЛОТНЯЕМОСТИ ТОРФЯНЫХ ПОЧВ**

**Я.М. Шупилов**, кандидат технических наук  
Белорусский государственный аграрный технический университет

**Ключевые слова:** торфяно-болотная почва, уплотнение, плотность почвы, энергоемкость уплотнения

### **Введение**

В последнее время ученые и специалисты основной причиной уплотнения почвы считают механическое воздействие ходовых систем тракторов, комбайнов, почвообрабатывающих машин, средств для внесения в почву органических и минеральных удобрений, извести и др. Почва, используемая в качестве среды для возделываемых сельскохозяйственных растений, в редких случаях полностью водонасыщена, при этом она практически не подвергается воздействию ходовых систем машин. Поэтому ее можно рассматривать, как трехфазную систему, показатели свойств которой зависят как от ее влажности, так и от плотности сложения. Изменение соотношения минеральной и органической составляющей в твердой фазе торфяно-болотной почвы также сильно влияет на ее свойства. Экспериментальные данные показывают, что увеличение содержания минеральной составляющей твердой фазы в почве уменьшает ее сжимаемость, улучшает прочностные, фильтрационные свойства и др.

Определение параметров водно-физических и механических свойств торфяно-болотной почвы в состоянии трехфазной системы является сложным, длительным и не всегда доступным на практике в лабораторных и полевых условиях. Поэтому в настоящее время предлагаются способы их определения через простейшие физические свойства – плотность сложения почвы и влажность. В процессе сельскохозяйственного использования торфяно-болотной почвы важно количественно оценить значение плотности сложения почвы в широком диапазоне влажностей при ее уплотнении машинами и механизмами в процессе обработки и при уходе за растениями.

### **Постановка задачи и алгоритм ее решения**

В естественном состоянии торфяно-болотная почва состоит из органического вещества и минеральных включений в виде зольных элементов торфообразователей, отложений солей, песчаных и илистых частиц и прочих элементов, содержание которых может существенно изменяться. Поэтому при составлении алгоритма задачи для оценки плотности сложения почвы при ее уплотнении машинами и механизмами в широком диапазоне влажностей естественным является условное выделение минеральной и органической составляющих твердой фазы почвы с последующим рассмотрением изменения

их плотности в сухом состоянии с возрастанием работы уплотнения. Так как имеющиеся в литературе данные по прочностным и деформационным характеристикам получены для торфа с определенной степенью зольности, то при рассмотрении почвы удобнее выделять не органическую и минеральную составляющие, а рассматривать отдельно торф с известными механическими характеристиками и минеральную составляющую.

При решении поставленной задачи примем следующие исходные данные: влажность почвы  $w$ , плотность почвы в сухом состоянии  $\rho_d$ , степень зольности почвы  $D_{ash}$ , плотность частиц почвы  $\rho_s$ , имеющиеся в наличии результаты ранее проведенных экспериментов по динамическому уплотнению минеральной и торфяно-болотной почвы (торф-аналог со степенью зольности  $D_{asha}$ , отличной от степени зольности рассматриваемой почвы  $D_{ash}$ ).

Как известно, деформируемость материала во многом определяется его влажностью и плотностью в сухом состоянии, поэтому найдем их для его отдельных составляющих из следующих предпосылок. Для случая, когда степень зольности почвы  $D_{ash}$  больше степени зольности торфа-аналога  $D_{asha}$ , масса твердых частиц почвы  $M$  будет определяться массой твердых частиц торфа-аналога  $M_a$  в составе почвы и массой остатка минеральных частиц  $M_{om}$ , обусловленного разницей в степени зольности почвы и торфа-аналога. Тогда масса твердых частиц почвы

$$M = M_a + M_{om}. \quad (1)$$

Массу остатка минеральных частиц в почве  $M_{om}$  определим как разницу в содержании массы минеральных частиц в почве  $M_m$  и массы минеральных частиц в торфе-аналоге  $M_{am}$ , т.е.

$$M_{om} = M_m - M_{am}. \quad (2)$$

Тогда с учетом (2) выражение (1) можно представить в виде

$$M = M_a + M_m - M_{am}. \quad (3)$$

Для единицы объема почвы (3) запишем как

$$m = m_a + m_m - m_{am} \quad (4)$$

Выражая величины, входящие в (4), через характеристики плотности материала в сухом состоянии, получим

$$c_{dm} = c_{da} + c_{dm} - c_{dam}, \quad (5)$$

где  $\rho_d$  – плотность почвы в сухом состоянии;  $\rho_{da}$  – плотность торфа-аналога в сухом состоянии;  $\rho_{dm}$  – плотность минеральной составляющей почвы в сухом состоянии;  $\rho_{dam}$  – плотность минеральной составляющей торфа-аналога в сухом состоянии.

При известных величинах степени зольности почвы  $D_{ash}$  и торфа-аналога  $D_{asha}$  значения  $\rho_{dm}$  и  $\rho_{dam}$  выразим через  $\rho_d$  и  $\rho_{da}$

$$c_{dm} = \frac{c_d D_{ash}}{100} \quad \text{и} \quad c_{dam} = \frac{c_{da} D_{asha}}{100}. \quad (6)$$

С учетом (6) выражение (5) запишем в виде

$$c_d = c_{da} + \frac{c_d D_{ash}}{100} - \frac{c_{da} D_{asha}}{100}, \quad (7)$$

откуда

$$c_{da} = c_d \frac{1 - 0,01D_{ash}}{1 - 0,01D_{asha}}. \quad (8)$$

Плотность остатка минеральных частиц в сухом состоянии в почве найдем как

$$\rho_{dom} = \rho_d - \rho_{da}. \quad (9)$$

Второй важной характеристикой, влияющей на деформируемость почвы и ее компонентов, полученных после выделения торфа-аналога и остатка минеральных частиц, является влажность. Степень водонасыщения почвы  $S_r$ , определим из выражения

$$S_r = \frac{w c_s c_d}{(c_s - c_d) c_b}, \quad (10)$$

где  $\rho_b$  – плотность воды.

С учетом этого предположения, влажность остатка минеральных частиц  $w_{om}$  найдем как

$$w_{om} = w_{omп} S_r, \quad (11)$$

где  $w_{omп}$  – влажность минерального остатка при полном заполнении пор водой (полная влагоемкость).

При определении полной влагоемкости минерального остатка будем считать, что она близка к полной влагоемкости минерального грунта, которая определяется его плотностью сложения. Ее величина уменьшается примерно с 32 до 18% при увеличении плотности сложения минерального грунта с 1,4 до 1,8 г/см<sup>3</sup> [1].

Влажность торфа-аналога  $w_a$  найдем, предварительно определив массу воды в единице объема почвы

$$m_b = w \rho_d, \quad (12)$$

и массу воды в остатке минеральной составляющей единицы объема почвы

$$m_{вом} = w_{om} \rho_{dom}. \quad (13)$$

Таким образом, масса воды в торфе-аналоге в единице объема почвы

$$m_{ва} = m_b - m_{вом} \quad (14)$$

или, с учетом (12) и (13),

$$m_{ва} = w \rho_d - w_{om} \rho_{dom}. \quad (15)$$

Тогда влажность торфа-аналога

$$w_a = \frac{m_{ва}}{m_a} = \frac{w c_d - w_{om} c_{dom}}{c_{da}}. \quad (16)$$

Объем торфа-аналога  $v_{ai}$  и остатка минеральных частиц  $v_{omi}$  в единице объема почвы при заданной работе уплотнения (количестве ударов трамбовки  $n_i$ ) для их извест-

ных значений массы  $m_a$  и  $m_{ом}$  и плотности в сухом состоянии  $\rho_{dai}$  и  $\rho_{domi}$  после уплотнения соответственно будет

$$v_{ai} = \frac{m_a}{c_{dai}} \quad (17)$$

и

$$v_{omi} = \frac{m_{ом}}{c_{dоmi}} \quad (18)$$

Тогда объем почвы  $v_i$  при заданной работе уплотнения (количестве ударов трамбовки  $n_i$ ) составит

$$v_i = v_{ai} + v_{omi}, \quad (19)$$

а плотность почвы в сухом состоянии для  $m = \rho_d$

$$c_{di} = \frac{m}{v_i} \quad (20)$$

При отсутствии результатов испытания почвы в приборах стандартного уплотнения или методом динамического уплотнения плотность сухой почвы может быть рассчитана по имеющимся данным уплотнения торфа и минеральных грунтов. Этот расчет предполагает определение плотности сложения торфа-аналога  $\rho_{dai}$  и остатка минеральных частиц  $\rho_{domi}$ , соответствующих некоторой работе (количеству ударов груза  $n_i$ ), которые могут быть найдены по вычисленным величинам влажностей  $w_a$  и  $w_{ом}$ .

*Расчет плотности сложения торфа и однородного песка в процесса динамического уплотнения*

В целях расчета плотности сложения низинного торфа с нарушенной структурой со степенью разложения 25-50% и степенью зольности 6-10% для установившегося процесса динамического уплотнения предложена [2] логарифмическая зависимость:

$$\frac{1}{c_{dai}} = \frac{1}{c_{da1}} - \frac{1}{k_a} \lg \frac{n_i}{n_1}, \quad (21)$$

где  $\rho_{dai}$  – плотность сложения торфа, г/см<sup>3</sup>, соответствующая любому количеству ударов  $n_i$  груза массой 2,5 кг;  $\rho_{da1}$  – то же при некотором начальном количестве ударов груза  $n_1$ ;  $1/k_a$  – угловой коэффициент, характеризующий интенсивность уплотнения торфа, см<sup>3</sup>/г.

Величина параметра  $1/\rho_{da1}$  в уравнении (21) для одного удара  $n_1=1$  определяется по формуле

$$\frac{1}{\rho_{da1}} = 3,75w_a^{0,4}, \quad (22)$$

а угловой коэффициент  $1/k_a$  из зависимости

$$\frac{1}{k_a} = -0,0136w_a^3 + 0,085 w_a^2 + 0,05w_a + 0,12, \quad (23)$$

где  $w_a$  – влажность торфа нарушенной структуры, доли единицы.

Зависимости (22) и (23) действительны для значений  $w_a = 10-680\%$ .

Для расчетов плотности сложения минерального остатка  $\rho_{dami}$ , представленного однородным песком, воспользуемся опытами А.Ф. Лебедева по уплотнению однородного песка при различной влажности и величинах уплотняющей работы, приведенными в книге [3], в соответствии с рис.1, т.е. будем считать, что в процессе динамического уплотнения плотность сухого минерального остатка  $\rho_{dami}$  и плотность сухого песка  $\rho_{dni}$  при одинаковой работе уплотнения равны. Естественно предположить, что логарифмическая зависимость, представленная в виде (21), пригодна не только для описания установившегося процесса динамического уплотнения низинного торфа с нарушенной структурой, но и минеральных грунтов, в том числе однородного песка. Для подтверждения этого предположения по графикам на рис.1 определялись значения плотности песка в сухом состоянии в зависимости от величины работы уплотнения для одинаковой влажности уплотнения. Было принято, что график «без уплотнения» на рисунке соответствует одному удару груза. Далее определялись величины  $1/\rho_{dni}$ , обратные плотности сухого песка и отношению ударов груза  $n_i/n_1$ , по которым с использованием электронной таблицы Excel для Windows строились линии тренда в виде логарифмических зависимостей, для которых отыскивались их параметры. Угловые коэффициенты, характеризующие интенсивность уплотнения песка  $1/k_n$ , получены делением коэффициентов при натуральных логарифмах на модуль десятичных логарифмов  $M=0,43$ .

По аналогии с (21) для установившегося процесса динамического уплотнения однородного песка логарифмическую зависимость можно записать в следующем виде:

$$\frac{1}{c_{dni}} = \frac{1}{c_{dn1}} - \frac{1}{k_n} \lg \frac{n_i}{n_1}. \quad (24)$$

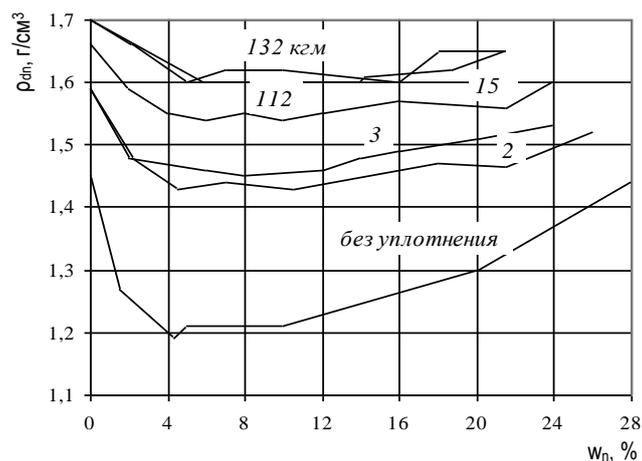


Рис. 1. Графики зависимости плотности сложения песка от влажности при различной работе уплотнения (по А.Ф. Лебедеву)

Входящую в уравнение (24) величину  $1/\rho_{dn1}$  можно выразить через влажность уплотняемого песка  $w_n$  для количества ударов груза  $n_1=1$  в виде корреляционной зависимости

$$\frac{1}{c_{dn1}} = 22,72w_n^3 - 10,42w_n^2 + 1,16w_n + 0,73, \quad (25)$$

для которой  $R^2=0,99$ .

Аналитическая зависимость значений угловых коэффициентов  $1/k_n$  от влажности подвергавшегося уплотнению песка  $w_n$  (в долях единицы) при тесноте линейной связи между признаками  $R^2=0,95$  имеет вид:

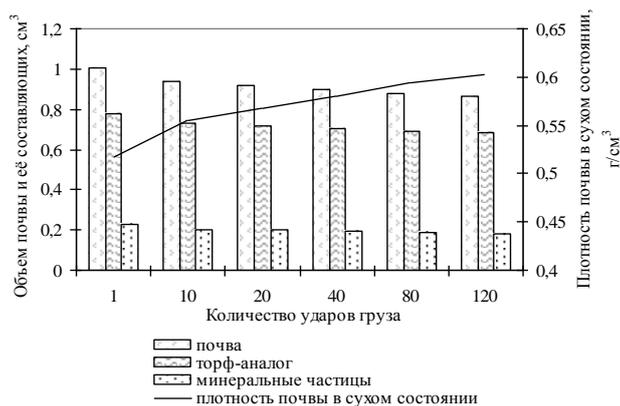
$$\frac{1}{k_n} = 5,42w_n^3 - 2,26w_n^2 + 0,18w_n + 0,069. \quad (26)$$

При вычислениях по зависимостям (25) и (26) следует учитывать, что они получены для диапазона влажностей однородного песка  $w_n = 2-20\%$ .

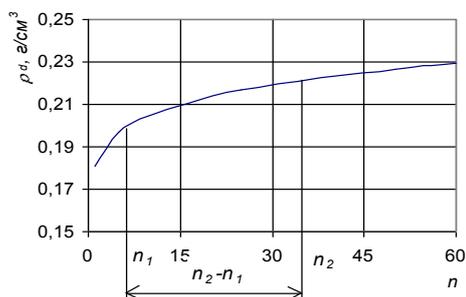
#### Расчет затрат энергии на уплотнение почвы

Как можно заметить, плотность сухой почвы, вычисленная с использованием аналитических зависимостей (21) и (24), соответствует процессу уплотнения, когда начальная плотность сухой почвы принята равной одному удару груза в приборе стандартного уплотнения. Для такого случая на рис.2 приводятся результаты расчета уплотнения торфяно-болотной почвы с влажностью  $w=39\%$ , степенью зольности  $D_{ash}=60\%$  и плотностью в сухом разрыхленном состоянии  $\rho_d=0,52$  г/см<sup>3</sup> ударами груза в приборе стандартного уплотнения.

На практике начальная плотность почвы в сухом состоянии может отличаться от принятой в полученных зависимостях, поэтому затраты энергии для достижения заданной плотности сложения будут иными. Их можно найти графоаналитическим методом.



**Рис. 2. Результаты расчета уплотнения торфяно-болотной почвы динамической нагрузкой: гистограмма изменения единицы объема почвы и ее составляющих – торфа-аналога и остатка минеральных частиц; график изменения плотности почвы в сухом состоянии**



**Рис. 3. К установлению величины затраты энергии для достижения заданной плотности сложения почвы**

С этой целью потребуется несколько определений плотности при различной работе уплотнения с последующим построением графической зависимости плотности почвы от работы уплотнения (количества ударов груза) в соответствии с рис.3. Искомые затраты энергии определяются из построенного графика по разности количества ударов груза  $n_2 - n_1$ , соответствующих плотностям почвы после и до ее уплотнения.

*Плотность сложения почвы при воздействии движителей машин*

Энергоемкость процесса уплотнения почвы в лабораторных условиях в кольце прибора стандартного уплотнения или рассчитанная согласно зависимостям, приведенным выше, характеризуется работой, затрачиваемой на уплотнение, и определяется по зависимости [2]

$$E_c = \frac{A_c \cdot n_c}{V_c}, \quad (27)$$

где  $A_c = m_r g h_r = 2,5 \cdot 9,81 \cdot 0,3 = 7,36$  Н·м – работа одного удара груза;  $m_r = 2,5$  кг – масса груза;  $h_r = 0,3$  м – высота падения груза;  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup> – ускорение свободного падения;  $n_c$  – количество ударов груза;  $V_c = 0,001$  м<sup>3</sup> – объем грунта, равный объему кольца прибора уплотнения.

Для приводимых условий и значений  $n$ , равных 1 и 90, величина  $E_c$  соответственно составляет 0,00204 и 0,18394 кВт ч/м<sup>3</sup> (в расчетах принято, что 1 кВт·ч =  $3,6 \cdot 10^6$  Н·м).

Установление затрат энергии в полевых условиях на уплотнение торфяно-болотной почвы машинами и механизмами строится на допущении, что химическая энергия горючего преобразуется в механическую. Если химическая энергия дизельного топлива составляет 42700 кДж/кг, то 1 кг такого топлива способен произвести 11,85 кВт ч (16,11 л.с. ч) механической энергии. Количество потребляемого горючего определяется по затратам времени на проведение работы по уходу за посевами, мощности машины и удельному расходу топлива.

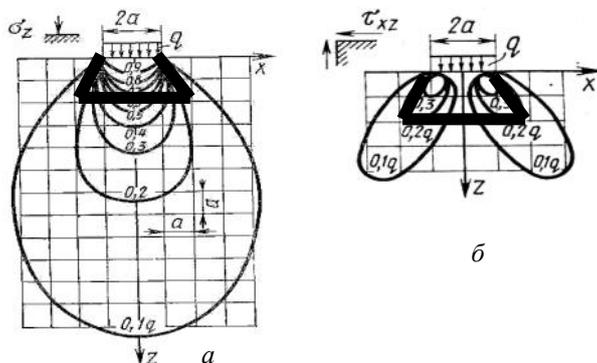
Энергоемкость динамического уплотнения почвы в полевых условиях определяется по зависимости

$$E_m = \frac{A_m \cdot n_m}{V_m}, \quad (28)$$

где  $A_m$  – работа по уплотнению почвы при одном проходе машины;

$n_m$  – количество проходов машины по одному следу;

$V_m$  – объем уплотняемой почвы.



**Рис. 4. Распределение напряжений в залежи под полосовой площадью загрузки:**  
**а – сжимающие напряжения  $\sigma_z$ ; б – касательные (сдвигающие) напряжения  $\tau_{xz}$**

Толщина слоя и объем уплотняемой почвы определяется с учетом распределения напряжений сжатия и сдвига в почве, рис.4, так как величины этих напряжений определяют степень его уплотнения на разной глубине. Для используемых в сельском хозяйстве машин при обработке почвы в расчетах толщину и ширину по верху уплотняемого слоя почвы движителями машин можно принять равными ширине гусеницы или расчетному диаметру отпечатка колеса, а ширину по низу уплотняемого слоя в два раза большей, как это можно видеть на рисунке. Количество ударов груза  $n_c$ , соответствующее энергоемкости динамического уплотнения почвы в полевых условиях при одном проходе машины  $E_{m1}$ , определяется по зависимости

$$n_c = \frac{E_{m1}}{E_{c1}}, \quad (29)$$

где  $E_{c1}$  – энергоемкость процесса уплотнения почвы в кольце прибора, соответствующая одному удару груза.

Для числа ударов груза  $n_c$ , вычисленных согласно (29), плотность сложения почвы при воздействии движителей сельскохозяйственных машин определяется по результатам лабораторных испытаний образцов почвы методом динамического уплотнения или находится расчетом согласно приведенной выше методике.

### **Выводы**

1. Предложена методика для оценки плотности сложения торфяно-болотной почвы путем выделения минеральной и органической составляющих с последующим рассмотрением изменения их плотности в сухом состоянии при возрастании работы уплотнения.
2. Предложены зависимости, позволяющие определять плотность сложения торфа и минерального остатка без проведения испытаний в приборах стандартного уплотнения.
3. Разработана методика оценки уплотняемости торфяно-болотных почв в полевых условиях с использованием данных лабораторных испытаний.

**Литература**

1. Методические указания по определению водно-физических свойств почвогрунтов мелиорируемых земель. – Мн.: БелНИИМВХ, 1973. – 83с.
2. Шупилов Я.М. Уплотнение торфяного грунта при действии динамической нагрузки // Строительство: Матер. Межд. науч.-техн. конф. «Геотехника Беларуси: наука и практика», 17-20 ноября 2003. – Мн.: БНТУ, 2003. – С. 169-172.
3. Винокуров Ф.П., Тетеркин А.Е., Питерман М.А. Строительные свойства торфяных грунтов. – Мн.: Изд-во АН БССР, 1962. – 284с.

**Summary**

**Shupilov J. ESTIMATION OF PEAT SOILS COMPACTIBILITY**

The technique of peat soils structure density estimation is offered for various ash content at dynamic loading action. Peat and the mineral residual with already known physicommechanical characteristics is discriminated in the soil structure when considering its structure. In field conditions the estimation of energy expenses for ground compression by machines and mechanisms is based on an assumption, that chemical energy of fuel will be transformed in mechanical energy. It is proposed to predict the density of ground structure on the basis of a ground compression power intensities ratio in field and laboratory conditions determining results.

*Поступила 26 апреля 2005 г.*