

УДК 631.45

### УСАДКА ТОРФА И ТОРФЯНО-БОЛОТНЫХ ПОЧВ

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

Под усадкой торфа понимают уменьшение его объема в результате удаления воды при высыхании или происходящих физико-химических процессов. Внешне на торфяной залежи с высокой влажностью это проявляется в появлении трещин на ее поверхности. В результате усадки торф становится плотнее и при достижении воздушно-сухого состояния – даже твердым. Увеличение плотности сухого торфа при усадке улучшает его механические свойства (повышает сопротивление сдвигу и снижает деформируемость), но возрастает водопроницаемость за счет изменения структуры порового пространства и наличия трещин, обычно сопровождающих усадку.

Процесс усадки сопровождается не только механическим уплотнением и растрескиванием торфа, но и перераспределением растворимых химических компонентов, что приводит к изменению характера структурных связей между частицами. В силу этого повышенную прочность и водостойкость сухого торфа можно объяснить увеличением концентрации солей на поверхности отдельных агрегатов торфа, через которые происходит испарение воды при усадке [1].

#### Относительная объемная усадка торфа

Величину усадки торфа принято характеризовать по уменьшению объема образца или его линейных размеров. В соответствии с этим различают относительную объемную и линейную усадку. Относительная объемная усадка торфа  $b_v$  в процентах к первоначальному объему выражается следующей зависимостью:

$$b_v = \frac{V_{w1} - V_{w2}}{V_{w1}} \times 100\%, \quad (1)$$

где  $V_{w1}$  – начальный объем торфа;  $V_{w2}$  – объем торфа после усадки.

Когда усадка торфа в пахотном слое почвы или элементе сооружения обусловлена уменьшением их толщины при неизменной площади, то зависимость (1) будет иметь вид

$$b_v = \frac{h_{w1} - h_{w2}}{h_{w1}} \times 100\% \quad (2)$$

где  $h_{w1}$  – начальная толщина слоя торфа;  $h_{w2}$  – толщина слоя торфа после усадки.

Если известна плотность сухого торфа до и после снижения влажности, т.е.  $\rho_{d1}$  и  $\rho_{d2}$ , то относительная объемная усадка определяется по зависимости

$$b_v = \left( 1 - \frac{\rho_{d1}}{\rho_{d2}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

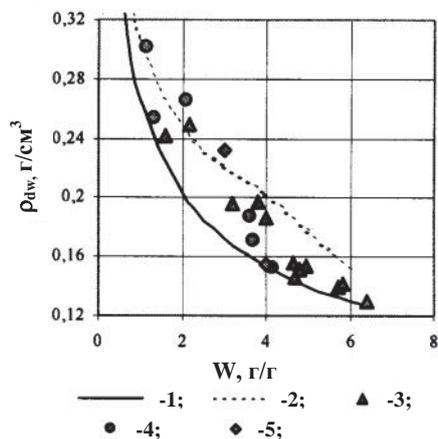
Для неуплотненного низинного торфа с нарушенной структурой входящие в выражение (3) величины можно определить из зависимости, приведенной в работе [2], которая после небольших преобразований имеет вид

$$r_{dw} = \frac{1}{3,75 w^{0,4}} \quad (4)$$

где  $w$  – абсолютная влажность торфа, в долях единицы;  $\rho_{dw}$  – плотность торфа в сухом состоянии, соответствующая влажности  $w$  для условий, когда затраты энергии на его уплотнение составляют 0,002 кВт·ч, т.е. практически отсутствуют.

Зависимость (4) получена для тростниково-осокового, древесно-осокового и осокового видов низинного торфа нарушенной структуры с плотностью частиц  $\rho_s = 1,52 \dots 1,65 \text{ г/см}^3$  и действительна в диапазоне абсолютных влажностей от 18 до 670 % для установившегося процесса механического уплотнения, когда прослеживается логарифмическая зависимость между величиной обратной плотности сухого торфа и количеством ударов груза в приборе стандартного уплотнения.

График зависимости (4) помещен на рис. 1, где можно видеть и график для плотности сухого торфа, соответствующий затратам энергии на уплотнение 0,184 кВт·ч, что эквивалентно четырем проходам по одному следу гусеничного трактора класса Т-100М. Для построенных графиков наблюдается общая закономерность, а именно: плотность сложения торфа с уменьшением влажности непрерывно увеличивается. Это говорит о том, что для приводимого на рис. 1 диапазона влажности торфа и условий испытания предел усадки отсутствовал, т.е. величина влажности, с уменьшением которой дальнейшего уменьшения его объема не происходило.



**Рис. 1. Зависимость плотности сухого торфа  $\rho_{dw}$  от абсолютной влажности  $w$ : 1 и 2 – для затрат энергии на уплотнение соответственно 0,002 и 0,184 кВт·ч; 3, 4 и 5 – данные (поле) соответственно А.Ф. Печкурова, П.К. Черника и К.П. Лундина**

Точки на рис. 1 соответствуют данным исследований А.Ф. Печкурова [3], П.К. Черника [4] и К.П. Лундина [5] для торфа залежи, используемой под сельскохозяйственные культуры.

Подавляющее большинство точек оказалось между построенными графиками, что и понятно, так как торф имел различную степень уплотнения от воздействия ходовых частей почвообрабатывающих машин. Наличие точек, оказавшихся выше кривой, соответствующей затратам энергии на уплотнение 0,184 кВт·ч, скорее всего, можно объяснить увеличением плотности сухого торфа за счет усадки, когда влажность залежи оказалась ниже приведенной на рисунке. Его повторное увлажнение вызвало увеличение влажности за счет заполнения водой свободного порового пространства и только частичное снижение плотности сложения

ния при разуплотнении в процессе набухания. Таким образом, зависимость (4) может быть использована как для определения изменения объема торфа, используемого в строительстве, так и в случае снижения содержания влаги в пахотном слое торфяной почвы, когда это снижение не приводило к его переосушению.

Закономерности усадки торфа

Зависимость объема торфа  $V_w$  при высушивании от абсолютной влажности  $w$  в общем виде выражается следующим образом [1]:

$$V_w = V_m \left( 1 + \beta_{0w} \frac{w}{100} \right). \quad (5)$$

где  $V_w$  – объем торфа в сухом состоянии, соответствующий влажности  $w$ , см<sup>3</sup>;  $V_T$  – объем твердой фазы торфа, см<sup>3</sup>;  $\beta_{0w}$  – коэффициент объемной усадки;  $w$  – абсолютная влажность торфа, %.

Так как плотность торфа в сухом состоянии  $\rho_{dw}$  с влажностью до высушивания  $w$  определяют как отношение массы  $m_T$  твердых частиц (сухого торфа) к занимаемому объему  $V_w$ , а плотность частиц торфа  $\rho_s$  – как отношение массы  $m_T$  твердых частиц к объему самих твердых частиц  $V_T$ , то для единицы массы  $m_T=1$  объем сухого торфа  $V_{w1}$  и объем твердых частиц  $V_{T1}$  могут быть определены соответственно как

$$V_{w1} = \frac{1}{\rho_{dw}} \quad (6)$$

и

$$V_{T1} = \frac{1}{\rho_s}. \quad (7)$$

Тогда выражение (5) для объема  $V_{w1}$  единицы массы торфа при высушивании будет иметь вид:

$$\frac{1}{\rho_{dw}} = \frac{1}{\rho_s} \left( 1 + \beta_{0w} \frac{w}{100} \right). \quad (8)$$

При полном насыщении водой объем единицы массы торфа в сухом состоянии  $V_{w1}$  представим как суммарный объем твердых частиц  $V_{T1}$  и воды  $V_{B1}$ , т.е.:

$$V_{w1} = V_{T1} + V_{B1}, \quad (9)$$

где первое слагаемое определяется согласно зависимости (7), а второе – как отношение массы воды  $m_{в1}$  для единицы массы торфа в сухом состоянии к плотности воды  $\rho_в$ :

$$V_{e1} = \frac{m_{e1}}{\rho_e} \quad (10)$$

Величина  $m_{в1}$ , выраженная через весовую влажность торфа  $w$ , в долях единицы, для массы сухого торфа в сухом состоянии  $m_{т1}=1$  составит

$$m_{e1} = w \times m_{m1} = w. \quad (11)$$

С учетом (11) выражение (10) будет иметь вид

$$V_{e1} = \frac{w}{\rho_e} \quad (12)$$

Разделим числитель и знаменатель (12) на  $\rho_s$

$$V_{e1} = \frac{\frac{w}{\rho_s}}{\frac{\rho_e}{\rho_s}} \quad (13)$$

и полученное выражение представим в виде

$$V_{e1} = \frac{1}{\rho_s} \frac{\rho_s}{\rho_e} w. \quad (14)$$

С учетом (6), (7) и (14) выражение (9) будет иметь вид:

$$\frac{1}{\rho_{dw}} = \frac{1}{\rho_s} + \frac{1}{\rho_s} \frac{\rho_s}{\rho_e} w. \quad (15)$$

После преобразования выражения (15) и представления абсолютной влажности в процентах

$$\frac{1}{\rho_{dw}} = \frac{1}{\rho_s} \left( 1 + \frac{\rho_s}{\rho_e} \frac{w}{100} \right). \quad (16)$$

Из зависимости (16) следует, что в период убывания влажности для водонасыщенного торфа коэффициент объемной усадки

$$b_{ow} = \frac{\rho_s}{\rho_a}. \quad (17)$$

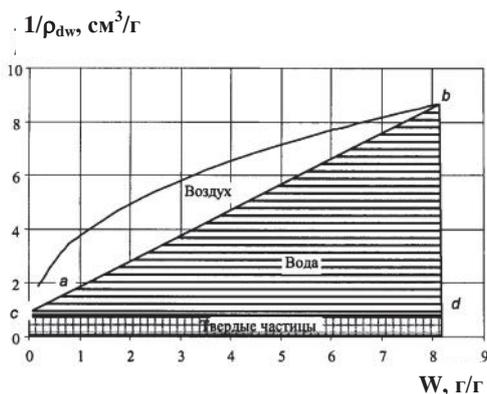
Графическое изображение зависимости (16) показано на рис. 2 прямой  $cb$ . Линия  $cd$  ограничивает содержание сухого вещества, объем которого определяется отрезком  $oc$  на оси ординат и, как видно из рисунка, остается неизменным. Объем воды для различных состояний торфа (влажности) определяется разностью ординат линий  $cb$  и  $cd$ .

При неполном заполнении пор водой для торфа с нарушенной структурой в неуплотненном состоянии значения  $1/\rho_{dw}$  определим из выражения (4) как

$$\frac{1}{\rho_{dw}} = 3,75 w^{0,4}. \quad (18)$$

Зависимость (18) графически показана на рис. 2 линией  $ab$ . На кривой усадки  $ab$  можно выделить отдельные участки с влажностью, в пределах которой интенсивность усадки заметно отличается, что можно объяснить установлением равновесия «между силами, возникающими при усадке и стремящимися сблизить частицы, и силами сопротивления структуры грунта» [6]. Разность ординат линий  $ab$  и  $cb$  определяет занятый воздухом объем пор.

По данным Н.С. Костюка [1], усадка торфа протекает лишь до определенной влажности. Для переработанного низинного и верхового торфа со степе-



**Рис. 2. Зависимость объема единицы массы торфа в сухом состоянии  $1/\rho_{dw}$  от его абсолютной влажности  $w$ .**

нию разложения 30 % объемная усадка прекращается при достижении им влажности 26...30 %. Она зависит и от степени разложения и механической переработки торфа. Их увеличение ведет к ее повышению. Усадка торфа зависит также и от его химического состава. Наиболее высокую усадку торфа вызывают гуминовые кислоты, наименьшую – лигнин.

Характер кривой *ab* указывает на то, что коэффициент объемной усадки торфа с нарушенной структурой, представляющий собой безразмерную величину, равную относительному уменьшению объема при изменении влажности на единицу, при проникновении в поры воздуха не будет величиной постоянной, а будет изменяться при снижении абсолютной влажности.

Согласно А.Ф. Печурову [3], изменение объема  $V_w$  образца торфа при сушке лучше отвечает выражению, рекомендованному С.С. Корчуновым

$$V_w = V_{w_0} (1 + \beta_0 w_{об}), \quad (19)$$

где  $V_{w_0}$  – объем абсолютно сухого образца, см<sup>3</sup>;  $\beta_0$  – коэффициент объемной усадки;  $w_{об}$  – объемная влажность торфа.

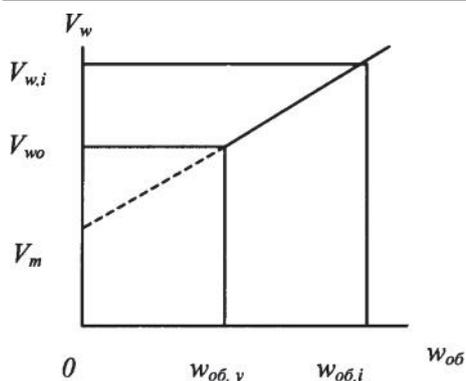
Рекомендуемые значения коэффициента объемной усадки для переработанного низинного торфа при степени разложения 20...50 % составляют 0,094...0,174. Что касается рекомендаций по установлению объема абсолютно сухого образца  $V_{w_0}$ , то они отсутствуют, поэтому использование зависимости (19) вызывает затруднения.

Как уже упоминалось ранее, усадка торфа протекает не до абсолютно сухого состояния, а до влажности, соответствующей пределу усадки  $w_{об,y}$  (рис. 3). Поэтому, очевидно, зависимость между объемом торфа  $V_w$  и его объемной влажностью  $w_{об}$  можно представить, как и в случае зависимости (5), через объем твердой фазы торфа  $V_t$ , который может быть установлен более определенно. Тогда

$$V_w = V_t (1 + \beta_{об} w_{об}). \quad (20)$$

Для единицы массы торфа в сухом состоянии выражение (20) будет иметь вид

$$\frac{1}{\rho_{dw}} = \frac{1}{\rho_s} (1 + \beta_{об} w_{об}). \quad (21)$$



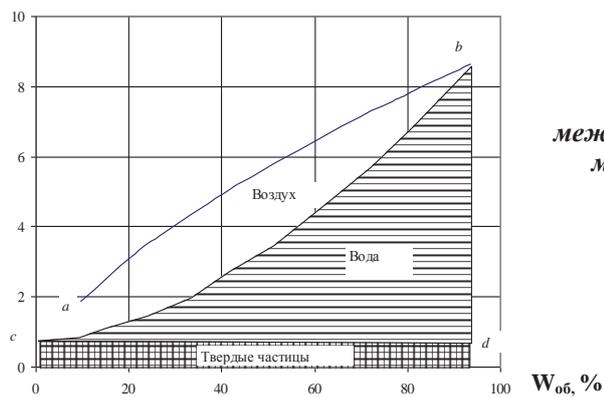
**Рис. 3. Зависимость между объемом торфа  $V_w$  и его объемной влажностью  $w_{об}$ :**  
 $w_{об,y}$  - объемная влажность предела усадки;  $V_{w0}$  - объем сухого грунта;  
 $V_m$  - объем твердых частиц.

Графически изменение объема единицы массы торфа в сухом состоянии  $1/\rho_{dw}$  от объемной влажности  $w_{об}$  представлено на рис. 4. Как и на рис. 2, там же изображено изменение объема сухого вещества (прямая  $cd$ ) и воды (линия  $cb$ ).

Вид зависимости  $1/\rho_d=f(w_{об})$  близкий к линейному (линия  $ab$ ), подтверждает предположение С.С. Корчунова о возможности представления изменения объема торфа от объемной влажности.

Коэффициент объемной усадки торфа  $\beta_{об}$  в зависимости (21) определялся графоаналитически, рис. 5, где по оси абсцисс откладывались значения объемной влажности  $w_{об}$ , а по оси ординат значения  $k=(\rho_s/\rho_{dw}) - 1$ .

$1/\rho_{dw}, \text{ см}^3/\text{г}$



**Рис. 4. Зависимость между объемом единицы массы торфа в сухом состоянии  $1/\rho_{dw}$  от объемной влажности  $w_{об}$ .**

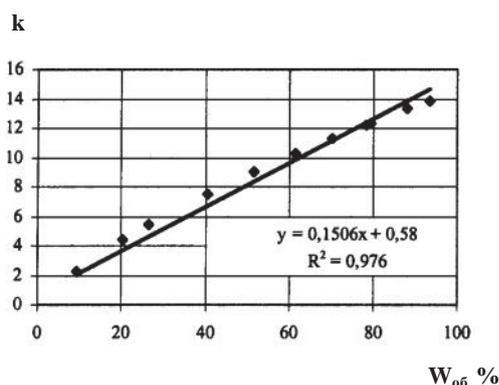


Рис. 5. К установлению коэффициента объемной усадки  $\beta_{об}$  торфа с плотностью частиц 1,72 г/см<sup>3</sup>.

Спрямяющие линии проводилась так, чтобы они проходили через точки, соответствующие принятым значениям  $\rho_s$ . Величины  $\beta_{об}$  для трех значений плотности частиц торфа  $\rho_s$  приводятся в таблице. Там же приведено значение квадрата коэффициента корреляции ( $R^2$ ), характеризующего степень сопряженности в вариации двух величин.

Сравнение результатов определения объемной усадки низинного торфа нарушенной структуры с плотностью твердых частиц  $\rho_s=1,55...1,72$  г/см<sup>3</sup> показало близкое совпадение с данными, приводимыми в работе [3] для переработанного низинного торфа со степенью разложения 30...40 %, т.е. степенью разложения торфа, который использовался в опытах при установлении зависимости (4).

Расчет усадки торфа

Для проведения расчетов по зависимости (20), кроме известной величины  $\beta_{об}$ , необходимо знать объем твердых частиц  $V_T$ .

**Влияние  $\rho_s$  на  $\beta_{об}$**

$\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	$\beta_{об}$	$R^2$
1,55	0,132	0,982
1,65	0,143	0,979
1,72	0,151	0,976

Величина  $V_T$  может быть получена как отношение массы

твердых частиц к плотности частиц торфа, т.е.

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_s}. \quad (22)$$

В свою очередь

$$m_T = \rho_{do} V_{wo}, \quad (23)$$

где  $\rho_{do}$  и  $V_{wo}$  – плотность сухого торфа и его объем в исходном состоянии.

Тогда, с учетом зависимости (23)

$$V_m = \frac{\rho_{do}}{\rho_s} V_{wo}. \quad (24)$$

Плотность торфа в сухом состоянии, как и всякого грунта, зависит от пористости и плотности частиц. Чем больше плотность частиц торфа, тем больше и плотность сложения торфа при одинаковой пористости. Это означает, что с увеличением зольности торфа растет и его плотность сложения. Таким образом, плотность сложения уменьшается со снижением степени разложения торфа и увеличивается при ее возрастании, что, очевидно, находится в соответствии с большим содержанием зольных частиц в процессе разложения торфа.

Плотность сложения и влажность могут значительно изменяться и с увеличением степени переработки торфа. По данным А.И. Федотова [7], первая ступень переработки позволяла увеличить плотность фрезеруемого слоя на 13, вторая – на 32, а третья – на 42 %.

Если допустить, что усадка торфа в пахотном слое почвы или элементе земляного сооружения происходит при неизменной площади  $F$ , то величина  $V_w$  в зависимости (20) может быть выражена через их толщину  $h_w$  при влажности  $w_{об}$  в виде  $V_w = Fh_w$ , а  $V_T$  через толщину слоя твердой фазы  $h_T$  как  $V_T = Fh_T$ , тогда усадка может быть описана следующей зависимостью:

$$h_w = h_m (1 + \beta_{об} w_{об}). \quad (25)$$

Для толщины слоя торфа в исходном состоянии  $h_{w0}$

$$h_m = \frac{\rho_{d0}}{\rho_s} h_{w0}. \quad (26)$$

Пример расчета усадки торфа по приводимым зависимостям

По данным обследования торфяной залежи на ПОСМЗиЛ ее толщина до осушения  $h_{w0}=70$  см при плотности сухого торфа  $\rho_{d0}=0,1$  г/см<sup>3</sup>. После осушения она уже составляла  $h_{wk}=25$  см с весовой влажностью  $w_k=60\%$ , плотностью сухого торфа  $\rho_{dk}=0,35$  г/см<sup>3</sup>. Плотность частиц торфа до и после осушения  $\rho_s=1,55$  г/см<sup>3</sup>. Требуется определить усадку торфа при осушении и сравнить ее с существующей.

Величина коэффициента объемной усадки торфа с нарушенной структурой и плотностью частиц  $\rho_s=1,55$  г/см<sup>3</sup> согласно приведенной в статье таблице  $\beta_{об}=0,132$ . Для определения толщины слоя твердой фазы  $h_T$  для залежи с  $h_{w0}=70$  см до осушения воспользуемся зависимостью (26), из которой

$$h_m = \frac{0,1}{1,55} \times 70 = 4,51 \text{ см.}$$

Объемная влажность торфа после осушения

$$w_{об,к} = w_k \rho_{dk} = 60 \times 0,35 = 21\%$$

и ей, согласно (25), будет соответствовать толщина слоя залежи

$$h_{wk} = 4,51(1 + 0,132 \times 21) = 17 \text{ см.}$$

Расхождение в определении искомой величины составляет  $25-17=8$  см, что, очевидно, обусловлено возможной ошибкой при определении мощности залежи из-за неточного установления границы торфа и подстилающих грунтов. Проверим это предположение, для чего по зависимости (3) определим относительную объемную усадку  $b_v$  через величины плотностей сухого торфа до и после осушения  $\rho_{дн}$  и  $\rho_{dk}$ ,

$$b_v = \left(1 - \frac{\rho_{дн}}{\rho_{dk}}\right) 100\% = \left(1 - \frac{0,1}{0,35}\right) 100\% = 71,4\%,$$

или 0,714 дол.ед.

Для найденной величины  $b_v$  из зависимости (2) толщина слоя залежи после осушения  $h_{wk} = h_{wo}(1-b_v) = 70(1-0,714) = 20$  см, что близко к вычисленной по (25).

### **Литература**

1. Костюк Н.С. Физика торфа. – Мн.:Вышэйшая школа, 1967. – 214 с.
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 г. – Мн.: БНТУ, 2003. – С. 169-172.
3. Печуров А.Ф. Устойчивость русел рек и каналов. – Мн.: Урожай, 1964. – 411 с.
4. Черник П.К., Рудой О.А., Скоропанов С.А. Расчет показателей свойств биогенных грунтов и органогенных почв. // Мелиорация переувлажненных земель. Сб. науч. работ БелНИИМиЛ. Т. XLVIII. – 2001. – С. 183-192.
5. Лундин К.П. Водные свойства торфяной залежи. – Мн.: Урожай, 1964. – 212 с.
6. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., и др. Грунтоведение. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1971. – 595 с.
7. Федотов А.И. Водно-физические свойства торфа. – Мн.: Наука и техника, 1977. – 118 с.

### **Резюме**

По результатам лабораторных исследований предлагаются зависимости для установления усадки торфа с нарушенной структурой, которые могут быть использованы и для прогнозирования усадки торфяной почвы, когда снижение влаги не приводит к ее переосушению. Для установления относительной объемной усадки предложена зависимость плотности сухого торфа при снижении влажности, а также величина коэффициента объемной усадки торфа.

**Ключевые слова:** торф, плотность торфа в сухом состоянии, влажность, усадка.

***Summary***

***Shupilov Ya. Contraction of peat and peat-boggy soils.***

To calculate contraction of peat with the infringed structure, relationships are offered. These are obtained on results of laboratory investigations and can be utilized to forecast contraction of a peat soil, when the decrease of a moisture does not result in overdraining. For calculation of a relative volume shrinkage the dependence of peat density as a function of humidity, and also value of a factor of a volume peat shrinkage are offered.

***Key words:*** peat, peat density in a dry state, humidity, contraction.