

*Черник Петр Константинович, канд. техн. наук,
ведущий специалист Республиканского унитарного предприятия
«Белгипроводхоз».*

*Азява Геннадий Васильевич, начальник технического отдела
Республиканского унитарного предприятия «Белгипроводхоз»*

***Определение показателей физических и механических
свойств биогенных грунтов и илов***

***Determination of the factors of physical and mechanical
characteristics of biogenic soils and silt***

Для биогенных грунтов и илов в зоне капиллярного насыщения и ниже уровня грунтовых вод при инженерно-геологических изысканиях предложено определять лишь два показателя физических свойств – влажность и степень зольности, а все остальные показатели физических свойств и состава определять расчетным путем отдельно для их минеральной и органической составляющих. Так как органическая составляющая связывает и удерживает основной объем воды, содержащейся в грунте, то показатели сжимаемости и прочности рекомендуется определять расчетом по влажности органической составляющей.

For the soil of nutrients and silt in the zone of capillary saturation and lower groundwater levels in the engineering and geological surveys suggested only two indicators to determine the physical properties - humidity and the degree of ash, while all the other indicators of the physical properties and composition to determine the calculated separately for their mineral and organic components. As an organic component binds and holds the bulk of the water in the soil, the figures compressibility and durability are encouraged to determine the calculation of moisture content of organic component.

При строительстве мелиоративных систем, осуществлении мероприятий по защите от затоплений, благоустройстве прибрежных зон и др. практически постоянно возникает необходимость строи-

тельства различных линейных сооружений (земляных плотин, ограждающих дамб, дорог) на биогенных грунтах и илах.

Специфической особенностью этих грунтов является неоднородность их состава, пестрота (часто чрезвычайная) показателей их свойств как по глубине залежи, так и по простиранию, что является следствием постоянно изменяющихся во времени условий их образования, а на пойменных участках и периодическими размывами и переотложением в периоды паводков, а также привнесением смытых частиц грунтов с повышенных элементов рельефа. Поэтому для достоверной оценки свойств этих грунтов при проведении инженерно-геологических изысканий по трассам линейных сооружений необходимо отбирать большое количество образцов для определения показателей их физических свойств.

Определение показателей физических свойств биогенных грунтов и илов производится по методикам, разработанным на основании опыта изучения свойств минеральных грунтов. Определение же показателей свойств биогенных грунтов по этим методикам является более трудоемким процессом чем для минеральных, кроме того косвенные методы, используемые для определения некоторых показателей физических свойств минеральных грунтов, не применимы для биогенных грунтов.

Все указанные особенности относятся и к процессу определения показателей механических свойств биогенных грунтов и илов (компрессионных, прочностных). Эти грунты характеризуются явно выраженными реологическими свойствами и поэтому определение их прочностных и компрессионных свойств в лабораторных условиях является весьма длительным и трудоемким процессом.

Диапазон изменения показателей механических свойств биогенных грунтов и илов, так же как и физических, чрезвычайно широкий даже для одного генетического вида этих грунтов и поэтому установить нормативные (осредненные) значения для них невозможно. Учитывая неоднородность состава и свойств биогенных грунтов при проектировании линейных сооружений необходимо выполнять большое количество определений параметров их механических свойств для оценки устойчивости и расчета осадки сооружений.

Учитывая указанные обстоятельства возникла необходимость в разработке методики, позволяющей упростить процесс определения показателей свойств биогенных грунтов и илов.

Отбор образцов естественного сложения для определения показателей физических свойств режущими кольцами (гильзами) известного объема для биогенных грунтов является сложной задачей, так как из-за их волокнистой структуры, наличия включений не полностью разложившихся древесных остатков, крупных пор, при отборе образцов неизбежно происходит нарушение естественного сложения, что вносит большие погрешности в результаты определений.

В биогенных грунтах ниже уровня грунтовых вод и в зоне капиллярного насыщения содержание воздуха и растворенных газов незначительное и их можно считать полностью водонасыщенными. При таком допущении зависимости между показателями их свойств можно выразить физическими формулами, вытекающими из определений показателей свойств для полностью водонасыщенных грунтов. Анализ большого количества экспериментальных данных для различных видов биогенных грунтов показал, что такое допущение является корректным, так как влияние содержащегося в них воздуха на значения показателей в таких условиях не превышает погрешностей, допускаемых при прямом определении показателей по общепринятой методике.

Это обстоятельство позволило исключить отбор образцов водонасыщенных биогенных грунтов и илов естественного сложения режущими кольцом известного объема, а при инженерно-геологических изысканиях отбирать (вырезать) образцы этих грунтов естественного сложения любой формы и объема для определения влажности и степени зольности, а остальные показатели определять расчетным путем.

Плотность частиц биогенных грунтов со степенью зольности $D_{ash} < 50\%$ определяется по формуле

$$\rho_s = \frac{100\rho_{so}}{100 - D_{ash} \left(1 - \frac{\rho_{so}}{\rho_{sm}}\right)}, \quad (1)$$

где ρ_{SO} – плотность частиц органической составляющей, расчетах принимается $\rho_{SO} = 1,51 \text{ г/см}^3$;

D_{ash} – степень зольности, %;

ρ_{sm} – плотность частиц минеральной составляющей.

$$\rho_{sm} = 2,72 \text{ г/см}^3.$$

Плотность частиц для заторфованных грунтов определяется по формуле

$$\rho_s = \rho_{SO} \left(1 - \frac{D_{ash}}{100}\right) + \rho_{sm} \frac{D_{ash}}{100}, \quad (2)$$

где $\rho_{SO} = 1,512 \text{ г/см}^3$;

$\rho_{sm} = 2,652 \text{ г/см}^3$ – для заторфованных песков;

$\rho_{sm} = 2,72 \text{ г/см}^3$ – супесей;

$\rho_{sm} = 2,752 \text{ г/см}^3$ – суглинков и глин.

Для илов и минеральных сапропелей $\rho_{sm} = 2,72 \text{ г/см}^3$.

Плотность сухого грунта (скелета) определяется по формуле

$$\rho_d = \frac{1}{W + \frac{\rho_w}{\rho_s}}, \quad (3)$$

где W – влажность грунта в долях единицы;

ρ_w – плотность воды, $\rho_w = 12 \text{ г/см}^3$.

Таким образом, для водонасыщенных биогенных грунтов и илов в зоне капиллярного насыщения и ниже уровня грунтовых вод достаточно определить два показателя физических свойств – влажность и степень зольности, вместо четырех по общепринятой

методике, а все остальные показатели определяются расчетом по формулам (1)–(3) и известным формулам механики грунтов. Следует отметить, что процесс непосредственного определения указанных показателей (влажности и степени зольности) является наиболее простым и надежным.

Определяемые по общепринятой методике показатели физических свойств биогенных грунтов являются осредненными значениями показателей их органической и минеральной составляющей, которые сильно отличаются и играют несопоставимо разную роль в формировании структуры и свойств этих грунтов. Например, влажность их определяется как отношение массы воды к массе сухого грунта (твердой фазы), то есть предполагается, что единица массы минеральной и органической составляющих этих грунтов связывают и удерживает в структуре грунта одинаковое количество воды по массе. Фактически единица массы органической составляющей связывает несопоставимо большее количество воды, чем единица массы минеральной составляющей. Следовательно, влажность органической составляющей (отношение массы связанной ею воды к сухой массе органической составляющей), которая характеризует ее способность связывать и удерживать большое количество воды, можно принять в качестве структурного показателя, определяющего механические свойства биогенных грунтов.

Для большинства биогенных грунтов удельный вес органической составляющей в составе грунта намного превосходит удельный вес их минеральной составляющей, что и определяет специфику механических свойств этих грунтов. Поэтому было предложено показатели свойств и состава биогенных грунтов устанавливать отдельно для их минеральной и органической составляющих, то есть условно разделять грунт на минеральную и органическую составляющие. Порядок расчета показателей состава водонасыщенных биогенных грунтов и илов приведен в таблице 1.

Водонасыщенные биогенные грунты характеризуются высокой пористостью, что обуславливает их сильную сжимаемость и большую осадку сооружений, величина которой зависит от мощности слоя этих грунтов в основании и от показателей сжимаемости каждого вида грунта. Так как по трассам линейных сооружений показатели свойств сильно изменяются, то для определения осадки, которую необходимо знать при расчете объема работ по возведению со-

оружения, требуется выполнить большое количество определений показателей сжимаемости, прямое определение которых является длительным процессом. Поэтому задача прямого определения показателей сжимаемости становится не реальной для проектных организаций. В связи с этим практический интерес представляет разработка методики определения показателей сжимаемости биогенных грунтов и илов расчетным путем по показателям их физических свойств.

Минеральная составляющая биогенных грунтов связывает и удерживает в структуре грунта незначительную часть от всего объема воды, содержащейся в грунте. Основной объем воды связывает и удерживает в грунте органическая составляющая за счет гигроскопичности. Частицы дисперсной фракции органической составляющей этих грунтов обладают высокой обменной способностью, связывают и удерживают вокруг себя несопоставимо большее количество воды, чем частицы минеральной составляющей. Определяемая же в лабораторных условиях влажность биогенных грунтов является осредненным значением влажности их минеральной и органической составляющих, которые фактически отличаются на порядок и выше.

Таблица 1

Расчет показателей состава водонасыщенных биогенных грунтов в единице объема $V = 1$

Показатели	Расчетные формулы
1	2
Масса твердой фазы	$M_d = \rho_d V = \rho_d$
Масса минеральной составляющей	$M_m = \frac{\rho_d D_{ash}}{100}$
Масса органической составляющей	$M_o = \rho_d (1 - \frac{D_{ash}}{100})$
Масса воды	$M_w = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}$
Массы воды в минеральной составляющей	$M_{wm} = 0,3 M_m$

1	2
Масса воды в органической составляющей	$M_{wo} = M_w - M_{wm}$
Влажность органической составляющей	$W_o = \frac{M_{wo}}{M_o}$
Толщина слоя минеральной составляющей h_m в слое грунта естественного сложения толщиной h	$h_m = \frac{V_m}{V} \cdot h = V_m \cdot h$
Объем минеральной составляющей	$V_m = \frac{M_m}{\rho_m} = \frac{M_m}{1,8}$
Толщина слоя органической составляющей h_o в слое грунта естественного сложения толщиной h	$h_o = h - h_m$

Так как количество воды, связанной и удерживаемой в структуре грунта минеральной составляющей несопоставимо мало в сравнении с количеством воды связанной органической составляющей, то правомочно допущение, что под действием уплотняющей нагрузки происходит процесс уплотнения за счет отжатия воды практически лишь из органической составляющей и при этом каждому значению величины уплотняющей нагрузки при стабилизации процесса уплотнения будет соответствовать определенное значение влажности органической составляющей, определяемой структурными особенностями рассматриваемого вида грунта, а именно, толщиной пленок воды вокруг твердых частиц органической составляющей, достигнутой в процессе уплотнения и формой связи воды с частицами при каждом значении величины уплотняющей нагрузки.

Даже небольшое содержание органического вещества в водонасыщенных минеральных грунтах на пойменных участках определяет значительное отличие их свойств, в части сжимаемости и прочности, от аналогичных по механическому составу минеральных грунтов не содержащих органического вещества, что следует учитывать при определении свойств и принятии инженерных решений.

Учитывая эти особенности предложено показатели свойств биогенных грунтов и илов определять отдельно для минеральной и органической составляющих. Так как сжимаемость минеральной составляющей этих грунтов несопоставимо мала в сравнении с органической и она занимает незначительную часть объема грунта (табл. 2), то ею можно пренебречь, а считать что сжимаемость грунта определяется сжимаемостью ее органической составляющей.

Таблица 2

Толщина слоя минеральной h_m и органической h_o составляющих для характерных видов биогенных грунтов естественного сложения в слое толщиной 100 см

Показатели	Грунты				
	торф	торф	заторфованный грунт	сапропель	сапропель
W , в д.е.	8,36	4,98	2,16	3,21	1,01
D_{ash} , %	6,0	28,1	62,0	50,4	88,8
$\rho_s, г/см^3$	1,54	1,72	2,21	1,94	2,60
$\rho_d, г/см^3$	0,111	0,180	0,383	0,264	0,717
W_o , в д.е.	8,87	6,81	5,19	6,29	6,64
h_m , см	0,37	2,81	13,19	7,39	35,37
h_o , см	99,63	97,19	86,81	92,61	64,63

Процесс изменения (снижения) влажности органической составляющей характеризует деформируемость (сжимаемость) ее в процессе уплотнения. Относительная деформация $\frac{S_o}{h_o}$ слоя органической составляющей толщиной h_o при снижении влажности равна

$$\frac{S_o}{h_o} = \rho_d \left(1 - \frac{D_{ash}}{100}\right) (W_o - W_{oi}), \quad (4)$$

где W_o – влажность органической составляющей до уплотнения;

W_{oi} – влажность органической составляющей после уплотнения.

На основании анализа экспериментальных данных, полученных в результате компрессионных испытаний различных видов биогенных грунтов и илов установлено, что изменение влажности органической составляющей для всех видов указанных грунтов описывается следующей зависимостью:

$$W_{oi} = \Phi = \left[(0,29 - 0,38W_o) \ell q \frac{\sigma}{0,0001} - 0,41W_o - 1,92 \right], \quad (5)$$

где W_o – влажность органической составляющей до уплотнения;

σ – величина уплотняющей нагрузки, МПа.

В качестве аргумента в формуле (5) используется влажность органической составляющей грунта, которая в отличие от традиционно используемых в аналогичных формулах коэффициента пористости или влажности грунта, для всех видов биогенных грунтов и илов изменяются в значительно более узком диапазоне, чем указанные параметры (табл. 2).

Для расчета устойчивости и режима возведения сооружения (режима загрузки слабого основания) необходимо иметь данные об изменении прочности биогенных грунтов в процессе уплотнения. Увеличение прочности этих грунтов описывается зависимостью аналогичной закону Кулона $\tau = c + \sigma tq\phi$. При неустановившемся процессе уплотнения, параметр $tq\phi$ является переменным и зависит от времени действия уплотняющей нагрузки. В зависимости от времени действия нагрузки $tq\phi$ изменяется от значений близких к нулю, при кратковременном действии нагрузки, до $tq\phi = const$ – при стабилизации процесса уплотнения от нагрузки на каждой ступени нагружения. Для каждого вида грунта параметр $tq\phi$ имеет посто-

янное значение при условии стабилизации процесса уплотнения и соответствует тангенсу угла внутреннего трения в законе Кулона. При этом частицы твердой фазы вместе со связанной ими водой можно рассматривать как твердые частицы, а трение между ними определяется вязкостью водных пленок, увеличивающейся с уменьшением их толщины при уплотнении.

На основании экспериментальных данных по стабилизированному сдвигу получены следующие зависимости параметра $tq\varphi$ от влажности органической составляющей W_o :

Для всех видов торфов

$$tq\varphi = 0,764 - 0,0164W_o, \quad (6)$$

для слабоминеральных сапропелей

$$tq\varphi = 0,644 - 0,0135W_o, \quad (7)$$

для среднеминеральных, минеральных сапропелей, заторфованных грунтов и илов

$$tq\varphi = 0,773 - 0,0118W_o. \quad (8)$$

Для параметра «С» не установлена статистически значимая связь ни с одним из показателей физических свойств и состава биогенных грунтов. Этот параметр аналогичен значению сцепления в формуле Кулона и характеризует прочность грунта в естественном состоянии (в залежи) при $\sigma = 0$.

На основании сравнения значений показателя «С», полученных при сдвиговых испытаниях, с результатами определения прочности в полевых условиях $t_{кр}$ с помощью сдвигомера – крыльчатки СК-8 его значение следует принимать равным

$$C = 0,8t_{кр}, \quad (9)$$

где $t_{кр}$ – прочность грунта в естественном состоянии (в залежи), определяемая в полевых условиях при инженерно – геологических изысканиях по методу вращательного среза сдвигомером – крыльчаткой СК-8.

Разработанные способы определения показателей свойств биогенных грунтов и илов позволяют существенно сократить объем работ по определению показателей в лабораторных условиях и получать более достоверную информацию о свойствах грунтов по трассам линейных сооружений.