

СТАТЬИ

УДК 622.271.7

**ВЛИЯНИЕ ВЛАЖНОСТИ НА ПОКАЗАТЕЛИ
ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДИСПЕРСНЫХ ГРУНТОВ****Кузьмин Г.П.***Институт мерзлотоведения СО РАН, Якутск, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru*

Важным компонентом дисперсных грунтов является вода, находящаяся в различном количестве и разных фазовых состояниях. В зависимости от влажности талые грунты могут быть двух- и трехкомпонентными и двух- и трехфазными, а мерзлые грунты могут содержать от двух до четырех компонентов и быть также двух- и трехфазными образованиями. Влажность влияет также на величины показателей физических свойств грунтов. Эти показатели в интервале влажности от нуля до полного насыщения пор водой выражаются известными зависимостями. При постоянной пористости грунтов увеличение влажности в этом интервале приводит к линейному увеличению плотности грунта и к линейному уменьшению содержания воздуха. Другие показатели физических свойств грунтов остаются неизменными. Влажность мерзлых мелкодисперсных грунтов может превышать полную влагоемкость, если в процессе промерзания образовались ледяные шлиры в результате миграции воды из талой зоны к фронту промерзания. В этом интервале влажности изменяется не только масса грунта, но и его объем. Вследствие этого изменяются величины всех основных физических характеристик грунтов. В статье показаны изменения числа компонентов и фаз талых и мерзлых дисперсных грунтов. Представлены известные выражения показателей физических свойств грунтов в талом и мерзлом состоянии в интервале влажности от нуля до полного заполнения пор водой. Обоснованы и получены зависимости физических характеристик мерзлых грунтов от влажности, превышающей полную влагоемкость. Определены показатели физических свойств образцов песка, супеси и суглинка при различных значениях влажности и представлены в виде графиков зависимости их от влажности.

Ключевые слова: грунты талые, грунты мерзлые, компоненты, фазы, показатели физических свойств, влажность, плотность, пористость, лед, незамерзшая вода, содержание воздуха

WATER CONTENT EFFECT ON SOIL PHYSICAL PROPERTIES**Kuzmin G.P.***Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru*

Water present in different phase states is an important component of soil. The amount and state of water determine the composition and properties of the soil. Depending on water content, unfrozen soils can have two or three components and two or three phases, while frozen soils can have two to four components and two or three phases. Water content also affects the physical characteristics of soils which are expressed by known relationships for water contents between 0 and full saturation. At constant porosity, an increase in water content within this range leads to a linear increase in soil density and a linear decrease in air content. Other physical characteristics remain unchanged. Water contents of frozen fine-grained soils may exceed the total water capacity if water migration from the unfrozen zone to the freezing front results in the development of ice lenses. This range of water contents is associated with changes not only in the mass, but also in the volume of the soil. As a result, all the main physical characteristics are changed. This paper demonstrates changes in the number of components and phases of unfrozen and frozen soils. The known relationships for physical properties of frozen and unfrozen soils in the range of water contents from 0 to full saturation are presented. Relationships are given which have been derived by the author relating the physical properties of frozen soils and water contents above saturation. Determinations of the physical characteristics obtained for sand, sandy silt and clayey silt at different water contents are described and presented in the form of graphs.

Keywords: unfrozen soil, frozen soil, component, phase, physical properties, water content, density, porosity, unfrozen water, air content

Дисперсные грунты являются многокомпонентными и многофазными образованиями, состоящими из твердых минеральных частиц, воды в различных состояниях и газов. Вода является важным компонентом, влияющим на состав и свойства талых и мерзлых дисперсных грунтов. От влажности грунтов зависят число компонентов и фаз, а также величины показателей физических свойств.

Целью исследования является определение числа компонентов и фаз дисперсных грунтов при различных значениях влаж-

ности и установление зависимостей показателей физических свойств этих грунтов от влажности.

Материалы и методы исследования

Компонентный и фазовый состав дисперсных грунтов определяется из современных представлений о процессах, происходящих в них при изменении влажности и фазового состояния. Следует различать два интервала влажности дисперсных грунтов. К интервалу I относятся влажности талых и мерзлых грунтов от нуля до пол-

ного водонасыщения. Влажность интервала II могут иметь только мелкодисперсные мерзлые грунты, в которых в процессе их промерзания вследствие миграции воды из талых зон к фронту промерзания образовались ледяные тела [1]. Влияние влажности на показатели физических свойств грунтов в интервале I влажности характеризуется известными зависимостями. Переменные физические характеристики мерзлых грунтов можно определить только при практически полном замерзании воды, приняв количество незамерзшей воды и воздуха равными 0.

Показатели физических свойств грунтов в интервале I влажности выражаются следующими известными зависимостями:

– плотность скелета грунта [2]

$$\rho_{d1} = \frac{m_d}{V_1}, \quad (1)$$

– плотность грунта [2]

$$\rho_1 = \rho_{d1}(1 + w), \quad (2)$$

– плотность твердых частиц [2]

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_d}, \quad (3)$$

– пористость грунта [2]

$$n_1 = \frac{\rho_s - \rho_{d1}}{\rho_s}, \quad (4)$$

– коэффициент пористости [2]

$$e_1 = \frac{\rho_s - \rho_{d1}}{\rho_{d1}}, \quad (5)$$

– коэффициент водонасыщения [2]

$$S_r = \frac{\rho_{d1}\rho_s w}{\rho_w(\rho_s - \rho_{d1})}, \quad (6)$$

– относительное содержание воздуха [3]

$$\frac{V_a}{V_1} = 1 - \rho_{d1} \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w_w}{\rho_w} + \frac{w - w_w}{\rho_i} \right), \quad (7)$$

где m_d – масса сухого грунта; V_a – объем воздуха; w – влажность грунта; w_{nf} – влажность при полной влагоемкости мерзлого грунта; V_1 – объем грунта при $0 \leq w \leq w_{nf}$; m – масса грунта; ρ_w – плотность воды; w_w – влажность по незамерзшей воде; ρ_i – плотность льда.

При $w = w_w = 0$ относительное содержание воздуха (7) равно пористости грунта

$$\frac{V_a}{V_1} = \left(\frac{\rho_s - \rho_{d1}}{\rho_s} \right). \quad (8)$$

Из формулы (7) при $\frac{V_a}{V_1} = 0$ находим полную влагоемкость талых грунтов ($w = w_w$)

$$w_{n,th} = \rho_w \left(\frac{1}{\rho_{d1}} - \frac{1}{\rho_s} \right), \quad (9)$$

мерзлых грунтов ($w_w = 0$)

$$w_{n,f} = \rho_i \left(\frac{1}{\rho_{d1}} - \frac{1}{\rho_s} \right). \quad (10)$$

В интервале II влажности физические характеристики мерзлых грунтов при $w_w = 0$ и отсутствии воздуха можно выразить следующими зависимостями:

– плотность скелета грунта

$$\begin{aligned} \rho_{d2} &= \frac{m_d}{V_2} = \frac{m_d}{V_1 + \Delta V_i} = \frac{m_d}{\frac{m_d}{\rho_{d1}} + \frac{m_d(w - w_{nf})}{\rho_i}} = \\ &= \frac{\rho_{d1}\rho_i}{\rho_i + \rho_{d1}(w - w_{nf})}, \end{aligned} \quad (11)$$

– плотность грунта

$$\rho_2 = \rho_{d2}(1 + w) = \frac{\rho_{d1}\rho_i(1 + w)}{\rho_i + \rho_{d1}(w - w_{nf})}, \quad (12)$$

– пористость грунта

$$n_2 = 1 - \frac{\rho_{d2}}{\rho_s} = 1 - \frac{\rho_{d1}\rho_i}{\rho_s[\rho_i + \rho_{d1}(w - w_{nf})]}, \quad (13)$$

– коэффициент пористости

$$e_2 = \frac{\rho_s}{\rho_{d2}} - 1 = \frac{\rho_s[\rho_i + \rho_{d1}(w - w_{nf})]}{\rho_{d1}\rho_i} - 1, \quad (14)$$

где V_2 – объем грунта при $w > w_{nf}$; ΔV_i – объем льда в шлирах; ρ_{d2} – плотность скелета грунта при $w \geq w_{nf}$.

Результаты исследования и их обсуждение

В табл. 1 показаны компоненты и фазы талых и мерзлых дисперсных грунтов различной влажности.

Таблица 1

Компоненты и фазы дисперсных грунтов различной влажности

| Грунты | Влажность | Компоненты | Фазы |
|---------|--------------------------------|--|-----------------------------------|
| Талые | $w = 0$ | Твердые частицы Воздух | Твердая Газообразная |
| | $0 < w < w_{n,th}$ | Твердые частицы Вода Воздух | Твердая Жидкая Газообразная |
| | $w = w_{n,th}$ | Твердые частицы Вода | Твердая Жидкая |
| Мерзлые | $w = 0$ | Твердые частицы Воздух | Твердая Газообразная |
| | $0 < w < w_{n,f}$ $w_w > 0$ | Твердые частицы Незамерзшая вода Лед Воздух | Твердая Жидкая Газообразная |
| | $w \geq w_{n,f}$ $w_w > 0$ | Твердые частицы Незамерзшая вода Лед Воздух | Твердая Жидкая Газообразная |
| | $w \geq w_{n,f}$ $w_w > 0$ | Твердые частицы Лед | Твердая |

$w_{n,th}$ – влажность при полной влагоемкости талых грунтов.

В интервале I влажности число компонентов изменяется в талых грунтах от двух до трех, в мерзлых – от двух до четырех, а число фаз и в талых и мерзлых грунтах – от двух до трех. В интервале II мерзлые грунты также являются четырехкомпонентными трехфазными системами. Однако при небольшом содержании незамерзшей воды их можно принимать как трехкомпонентные двухфазные, а если не учитывать незначительное количество воздуха в них – как двухкомпонентные однофазные системы. Показатели физических свойств грунтов на изменение влажности реагируют различным образом. В интервале I при повышении влажности плотности талых и мерзлых грунтов линейно повышаются от величины, равной плотности скелета грунта при нулевой влажности, до максимального значения при полном заполнении пор водой и льдом, коэффициент водонасыщения возрастает от 0 до 1, относительное содержание воздуха уменьшается от величины, равной пористости грунта, до 0. Остальные показате-

тели остаются неизменными. В интервале II влажность мерзлых глинистых грунтов при определенных условиях может превышать полную влагоемкость. В результате миграции воды из талой зоны к фронту промерзания грунта образуются ледяные шпильки. В этом интервале влажности мерзлые грунты также состоят из четырех компонентов и трех фаз. В них также содержится незамерзшая вода, количество которой зависит от степени дисперсности и температуры грунта, и небольшое количество воздуха в растворенном виде в незамерзшей части воды и в виде пузырьков во льду. При достаточно низких температурах, когда количество незамерзшей воды становится незначительным, мерзлые грунты можно считать трехкомпонентными двухфазными образованиями. Если при этом не учитывать небольшое количество воздуха во льду, то их можно отнести к двухкомпонентным однофазным системам. В этом случае по изменению массы и объема грунтов можно определить их физические характеристики.

Таблица 2

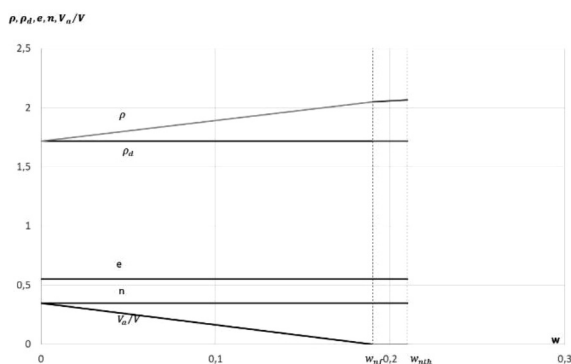
Физические характеристики грунтов по данным инженерно-геологических изысканий

| Тип грунта | W , д.е. | ρ_a , г/см ² | ρ , г/см ² | ρ_s , г/см ² | n , % | e , д.е. | $\frac{V_a}{V}$, д.е. при $w = 0$ по ф-ам |
|------------|---------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|------------|---------------|---|
| Песок | 0,16 | 1,72 | 2,00 | 2,66 | 35,3 | 0,546 | 0,353 |
| Супесь | 0,24 | 1,52 | 1,88 | 2,71 | 43,9 | 0,783 | 0,439 |
| Суглинок | 0,33 | 1,30 | 1,73 | 2,71 | 52,0 | 1,085 | 0,520 |

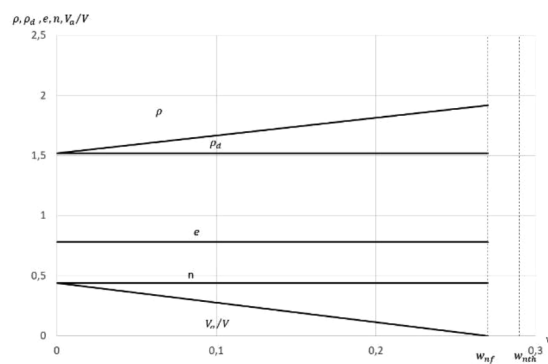
Таблица 3

Расчетные показатели физических свойств грунтов при различных значениях влажности

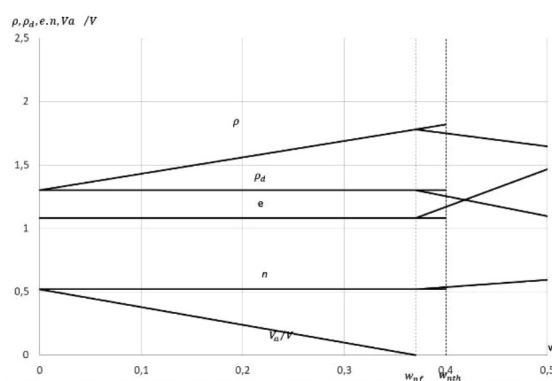
| Тип грунта | W , д.е. | ρ_s , г/см ³ | ρ_d , г/см ³ | ρ , г/см ³ | $\frac{V_a}{V}$, д.е. | n , % | e , д.е. |
|------------|------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|------------------------|---------|------------|
| Песок | 0 | 2,66 | 1,72 | 1,72 | 0,353 | 0,353 | 0,546 |
| | $w_{nh} = 0,205$ | 2,66 | 1,72 | 2,073 | 0 | 0,353 | 0,546 |
| | $w_{nf} = 0,189$ | 2,66 | 1,72 | 2,045 | 0 | 0,353 | 0,546 |
| Супесь | 0 | 2,71 | 1,52 | 1,52 | 0,439 | 0,439 | 0,78 |
| | $w_{nh} = 0,289$ | 2,71 | 1,52 | 1,959 | 0 | 0,439 | 0,78 |
| | $w_{nf} = 0,266$ | 2,71 | 1,52 | 1,924 | 0 | 0,439 | 0,78 |
| | 0,50 | 2,71 | 1,101 | 1,652 | 0 | 0,594 | 1,46 |
| Суглинок | 0 | 2,71 | 1,30 | 1,30 | 0,520 | 0,520 | 1,085 |
| | $w_{nh} = 0,400$ | 2,71 | 1,30 | 1,820 | 0 | 0,520 | 1,085 |
| | $w_{nf} = 0,368$ | 2,71 | 1,30 | 1,779 | 0 | 0,520 | 1,085 |
| | 0,37 | 2,71 | 1,30 | 1,780 | 0 | 0,520 | 1,085 |
| | 0,40 | 2,71 | 1,30 | 1,820 | 0 | 0,520 | 1,085 |
| | 0,50 | 2,71 | 1,098 | 1,647 | 0 | 0,595 | 1,467 |
| | 0,60 | 2,71 | 0,981 | 1,570 | 0 | 0,638 | 1,762 |
| | 0,70 | 2,71 | 0,887 | 1,507 | 0 | 0,673 | 2,057 |



а)



б)



в)

Графики зависимости показателей физических свойств грунтов:
а – песок; б – супесь; в – суглинок

Показатели физических свойств грунтов при различных значениях влажности определены для грунтов, принятых по гранулометрическому составу [4] как песок, супесь и суглинки. Данные по этим грунтам взяты из материалов инженерно-геологических изысканий трассы автомобильной грунтовой дороги местного значения (табл. 2).

В табл. 3 и на рисунке приведены результаты определения показателей физических свойств грунтов, рассчитанные по формулам (1)–(7) и (11)–(14) с использованием данных инженерно-геологических изысканий из табл. 2.

Графики для песка и супеси построены в интервале I влажности (рисунок, а, б), а для суглинка, в котором возможно образование ледяных шпиров и превышение влажности полной влагоемкости пор, построены в обоих интервалах влажности (рисунок, в). В интервале I влажности как в талых, так и мерзлых грунтах с повышением влажности пропорционально увеличивается плотность грунтов и уменьшается содержание в них воздуха. В мерзлых грунтах в интервале II при незначительном количестве незамерзшей воды и воздуха, которыми можно пренебречь, по мере повышения влажности плотности грунта и скелета грунта уменьшаются, а пористость и коэффициент пористости возрастают с затухающей скоростью. Очевидно, изменения показателей физических свойств грунтов приводят к изменениям механических их свойств [5], что является задачей дальнейших исследований.

Заключение

Влажность дисперсных грунтов подразделяется на два интервала – интервал I влажности от нуля до полного заполнения пор водой в различных состояниях и интервал II влажности, превышающей полную влагоемкость. Состав грунтов изменяется на всем интервале изменения влажности. В интервале I, в котором изменяются плотность грунта и содержание воздуха, изменяются прочностные и деформационные свойства талых и мерзлых грунтов. В интервале II с повышением влажности уменьшаются плотности грунта и скелета грунта и увеличиваются пористость и коэффициент пористости, т.е. мерзлые грунты все больше приобретает механические свойства льда.

Список литературы

1. Горелик Я.Б., Колунин В.С. Физика и моделирование криогенных процессов в литосфере. Новосибирск: Издательство СО РАН, филиал «Гео», 2002. 317 с.
2. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
3. Кузьмин Г.П. Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов: материалы IX Международного симпозиума (г. Мирный, 3–7 сентября 2011 г.). Мирный, 2011. С. 59–62.
4. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. М.: Стандартинформ, 2016. 20 с.
5. Фонарев П.А., Емельянов С.Н., Кочеткова Р.Г., Левочкина Т.В., Назипова Г.А. Геотехнические свойства грунтов: учебно-методическое пособие / Под ред. П.А. Фонарева. М.: МАДИ, 2017. 56 с.