

УДК 622.271.7

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Кузьмин Г.П.

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск, e-mail: kuzmin mpi.ysn.ru

Отмечено, что физические свойства грунтов определяют механические, фильтрационные и другие их свойства. Приведены формулы взаимосвязи показателей физических свойств грунтов, полученных автором и предшествующими исследователями. Изложены результаты анализа и сравнения этих формул. Показано, что формула автора, в отличие от существующих зависимостей, прямо или косвенно учитывает связь всех основных физических характеристик грунтов. Установлено, что формулы предшественников дают существенные погрешности при определении плотности скелета грунтов, изменяющуюся от максимального в сухом состоянии грунтов до нулевого значения при полном заполнении пор водой и льдом. Приводится зависимость изменения погрешности расчетного определения плотности скелета грунтов от влажности. Формула автора позволяет по экспериментально найденным значениям влажности, плотности скелета и твердых частиц определить пористость, полную влагоемкость и воздушную пористость талых и мерзлых грунтов. Отмечено, что эти показатели могут быть оперативно найдены также из предварительно построенных графиков зависимости воздушной пористости грунтов от их влажности, при различных постоянных значениях плотности скелета грунтов. Для этого можно воспользоваться значениями плотности скелета грунта, плотности твердых частиц и влажности грунтов, получаемыми в процессе проведения инженерно-геологических изысканий. Указано, что, пользуясь формулой автора при определенных допущениях, можно определить по экспериментальным данным продольной деформации замерзающих образцов количество незамерзшей воды в мерзлых грунтах.

Ключевые слова: взаимосвязь, грунт, плотность, влажность, пористость, незамерзшая вода

ANALYSIS OF CORRELATIONS AMONG SOIL PHYSICAL PROPERTIES

Kuzmin G.P.

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk, e-mail: kuzmin@mpi.ysn.ru

Physical properties of soils determine their mechanical, hydraulic and other properties. This paper presents correlations for soil physical properties obtained by the author and previous investigators. Their analysis and comparison demonstrate that, in contrast to the existing correlations, the author's equation directly or indirectly accounts for relationships among all the main physical soil characteristics. The previous correlation equations are shown to give significant errors when used to estimate dry density varying from a maximum value in the dry state to zero in the completely water and ice saturated condition. A relationship between error in dry density estimates and moisture content is given. The equation developed by the author allows for determining porosity, total moisture capacity and air porosity of frozen and thawed soils from experimentally determined values of moisture content, dry density and solids density. These parameters can also be found readily from charts of air porosity versus moisture content at different constant values of dry density. For this, dry density, solids density and moisture content values obtained by subsurface investigation programs can be used. The author's equation can, with some assumptions, be used to determine the amount of unfrozen water in frozen soils from test data for axial strain in freezing specimens.

Keywords: correlation, soil, density, water content, porosity, unfrozen water

Изучение физических свойств грунтов, которые определяют прочностные, деформационные, теплофизические, фильтрационные и другие их свойства, имеет особое практическое значение. Физические свойства грунтов определяются в процессе выполнения инженерно-геологических изысканий на площадках строительства всех видов сооружений, в том числе при строительстве подземных резервуаров [1]. В работе [2] излагается функциональная связь физических и прочностных характеристик грунтов, предназначенная для предварительной оценки и сопоставления искомых величин.

Грунты представляют собой многокомпонентные системы, состоящие из твердых минеральных частиц, воды в различных фазовых состояниях и газов. В работе [3]

мерзлые грунты рассматриваются как многокомпонентные, многофазные физико-химические системы, изменяющиеся в зависимости от термодинамических параметров их состояния.

Показатели физических свойств грунтов взаимосвязаны друг с другом и изменение одного из них приводит к изменению других. В формулах взаимосвязи предшественников участвуют не все основные физические характеристики грунтов. В связи с этим предложена более общая формула, которая учитывает все основные показатели физических свойств грунтов.

В статье выполнен анализ формул взаимосвязи физических характеристик грунтов на всем диапазоне изменения их влажности от 0 до полной влагоемкости талых и мерзлых грунтов.

Результаты анализа формул взаимосвязи

Физические свойства грунтов характеризуются в основном плотностью грунта ρ , плотностью скелета грунта ρ_d , плотностью твердых частиц ρ_s , влажностью w , пористостью n , относительным содержанием воздуха (воздушной пористостью) $\frac{V_a}{V}$ и содержанием незамерзшей воды в мерзлых грунтах w_w .

А.М. Пчелинцевым [4] получена следующая формула взаимосвязи физических характеристик грунтов:

$$\rho_1 = \frac{\rho_s \rho_w \rho_i (1+w)}{\rho_w \rho_i + \rho_s [\rho_w w - w_w (\rho_w - \rho_i)]}, \quad (1)$$

где ρ_w – плотность воды; ρ_i – плотность льда.

Так как $\rho_1 = \rho_{d1} (1+w)$, формулу (1) можно представить в виде

$$\rho_{d1} = \frac{\rho_s \rho_w \rho_i}{\rho_w \rho_i + \rho_s [\rho_w w - w_w (\rho_w - \rho_i)]}. \quad (2)$$

В формуле (2) не учитывается количество воздуха, содержащегося в грунтах при неполном заполнении пор водой и льдом.

В связи со сложностью определения плотности мерзлых грунтов ненарушенного сложения в оттаявшем состоянии И.Н. Вотяковым [5] была предложена расчетная формула для определения плотности мерзлых грунтов по одной только влажности:

$$\rho_{d,2} = \frac{2,4}{0,9 + 2,7w}. \quad (3)$$

Формула (3) получена при $\rho_s = 2,7 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$; $\rho_w = 1,0 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ и $\rho_i = 0,9 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}$ из зависимости

$$\rho_{d,2} = \frac{\rho_s \rho_i}{\rho_i + \rho_s w}. \quad (4)$$

В работе автора [6] предложена формула взаимосвязи, включающая все основные физические характеристики грунтов:

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_{d,3} \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} + \frac{w - w_w}{\rho_i} \right). \quad (5)$$

Представим (5) в виде

$$\rho_{d,3} = \frac{\rho_s \rho_w \rho_i}{\rho_w \rho_i + \rho_s [\rho_w w - w_w (\rho_w - \rho_i)]} \left(1 - \frac{V_a}{V} \right). \quad (6)$$

Приведенные формулы взаимосвязи (2), (4) и (6) в зависимости от фазового состояния воды в грунтах имеют вид

– в талых грунтах ($w_w = w$)

$$\rho_{d,1} = \rho_s \frac{\rho_w}{\rho_w + \rho_s w}, \quad (7)$$

$$\rho_{d,3} = \rho_s \frac{\rho_w}{\rho_w + \rho_s w} \left(1 - \frac{V_a}{V} \right); \quad (8)$$

– в мерзлых грунтах ($w_w = 0$)

$$\rho_{d,1} = \rho_{d,2} = \rho_s \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_s w}, \quad (9)$$

$$\rho_{d,3} = \rho_s \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_s w} \left(1 - \frac{V_a}{V} \right). \quad (10)$$

При критических значениях влажности грунтов формулы (7)–(10) приобретают вид:

– в талых грунтах

при $w_w = w = 0$

$$\rho_{d,1} = \rho_s, \quad (11)$$

$$\rho_{d,3} = \rho_s \left(1 - \frac{V_a}{V} \right) \quad (12)$$

или

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \frac{\rho_{d,3}}{\rho_s} = n; \quad (13)$$

при $w_w = 0$, $w = w_{n,th}$ и $\frac{V_a}{V} = 0$

$$\rho_{d,1} = \rho_{d,3} = \rho_s \frac{\rho_w}{\rho_w + \rho_s w_{n,th}}; \quad (14)$$

– в мерзлых грунтах
при $w_w = w = 0$

$$\rho_{d,1} = \rho_{d,2} = \rho_s, \quad (15)$$

$$\rho_{d,3} = \rho_s \left(1 - \frac{V_a}{V} \right) \quad (16)$$

или

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \frac{\rho_{d,3}}{\rho_s} = n; \quad (17)$$

при $w_w = 0$, $w = w_{n,f}$ и $\frac{V_a}{V} = 0$

$$\rho_{d,1} = \rho_{d,2} = \rho_{d,3} = \rho_s \frac{\rho_i}{\rho_i + \rho_s w_{n,f}}. \quad (18)$$

Формулы (2) и (4) по сравнению с (6) дают, как следует из выражений (7)–(10), завышенные значения плотности грунтов, определяемые отношением

$$\frac{\rho_{d,1}}{\rho_{d,3}} = \frac{\rho_{d,2}}{\rho_{d,3}} = \frac{1}{1 - \frac{V_a}{V}}. \quad (19)$$

На основании (13) максимальная погрешность по зависимости (19) при $w_w = w = 0$ составляет $\frac{\rho_{d,1}}{\rho_{d,3}} = \frac{\rho_{d,2}}{\rho_{d,3}} = \frac{\rho_s}{\rho_{d,3}}$.

Из зависимостей (11), (12) и (14)–(16) видно, что с увеличением влажности грунтов ошибка в определении плотности грунтов по формулам (2) и (4) уменьшается от максимальной при $w = 0$ до нулевого значения при $w = w_n$. Ошибочность определения плотности грунтов по формулам (2) и (4) подтверждается равенствами (11) и (15), которые справедливы только для непористых грунтов.

Формула (6) позволяет определять по экспериментально найденным значениям ρ_d и w пористость, воздушную пористость и полную влагоемкость талых и мерзлых грунтов [6].

Эти определения можно сделать также из предварительно построенных графиков зависимости (5) [6]. Кроме того, при определенных допущениях формула (6) дает возможность определять количество незамерзшей воды в мерзлых грунтах [7].

Графическое представление зависимости (5) и определение количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах

Зависимость (5) характеризует взаимосвязь показателей физических свойств грунтов, содержащих незамерзшую воду ($0 \leq w_w < w$). Графически эта зависимость может быть представлена [6] отдельно для талых грунтов и мерзлых грунтов в диапазоне незначительных фазовых переходов воды и можно пренебречь содержанием небольшого количества незамерзшей воды:

для талых грунтов ($w_w = w$)

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right), \quad (20)$$

для мерзлых грунтов ($w_w = 0$)

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_i} \right). \quad (21)$$

Зависимости (20) и (21) являются линейными уравнениями. При $w = 0$ графики для талых и мерзлых грунтов сходятся в одной точке, ордината которой равна пористости грунта.

При полном заполнении пор грунта водой $\frac{V_a}{V} = 0$. Тогда из зависимостей (20) и (21) получаем выражения полной влагоемкости талых и мерзлых грунтов соответственно:

$$w_{th} = \rho_w \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right), \quad (22)$$

$$w_f = \rho_i \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right). \quad (23)$$

В настоящее время разработаны различные методы определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах, основанные на использовании теплового эффекта фазового перехода воды, адсорбции, криоскопии, ядерно-магнитного резонанса и др. [8, 9 и др.], требующие сложного оборудования и эксперимента, а некоторые из них имеют ограничения по температуре. Разработанный метод основан на положении о том, что количество незамерзшей воды в мерзлых грунтах практически не зависит от влажности грунта и закономерности деформации водонасыщенного образца грунта в условиях невозможности бокового его расширения при кристаллизации поровой воды [7]. Способ заключается в следующем. Образец талого грунта помещают в металлический стакан и насыщают водой до полного заполнения пор водой и замораживают при постоянной заданной температуре до полной стабилизации деформации, происходящей в условиях невозможности бокового расширения только в продольном направлении.

Из зависимости (5) при полном насыщении пор грунта водой, т.е. $V_a/V = 0$ получаем выражение влажности грунта по незамерзшей воде

$$w_w = \frac{\rho_w \rho_i}{\rho_w - \rho_i} \left(\frac{w_n}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_d} \right), \quad (24)$$

где w_n – влажность водонасыщенного грунта.

Влажность грунта при полной влагоемкости определяется зависимостью

$$w_n = \rho_w \frac{(\rho_s - \rho_{d,0})}{\rho_s \rho_{d,0}}, \quad (25)$$

где $\rho_{d,0}$ – плотность скелета грунта при $w = w_n$.

Объем образца водонасыщенного грунта в процессе кристаллизации поровой воды увеличивается в соответствии с увеличением объема последней при переходе ее в лед и при невозможности бокового расширения образца зависимость (24) с учетом (25) принимает вид

$$w_w = \frac{\rho_w \rho_i}{\rho_w - \rho_i} \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{\rho_w}{\rho_i} \frac{(\rho_s - \rho_{d,0})}{\rho_s \rho_{d,0}} - \frac{S(h_0 + \Delta h)}{m_d} \right), \quad (26)$$

где S – площадь поперечного сечения образца; h_0 – начальная высота талого водонасыщенного образца грунта; Δh – приращение высоты образца в процессе кристаллизации поровой воды.

В зависимости (26) можно принять, что плотности компонентов мерзлого грунта при изменении температуры остаются неизменными, так как температурные деформации их очень незначительны. Тогда, предварительно определив значения плотности компонентов, массу и размеры образца, по экспериментально найденному значению приращения высоты образца при заданной температуре, можно определить влажность мерзлого грунта по незамерзшей воде.

Заключение

На основе анализа формул взаимосвязи показателей физических свойств грунтов установлено, что формула (6) по отношению к формулам (2) и (4) является более общей зависимостью, удовлетворяющей граничным условиям при критических значениях влажности грунтов, что позволяет по данным инженерно-геологических изысканий определять, кроме пористости и полной влагоемкости, воздушную пористость талых и мерзлых грунтов.

Формула (6) может быть представлена в виде графиков зависимости воздушной пористости талых и мерзлых грунтов от их влажности для оперативного определения ряда показателей их физических свойств

После определенных допущений из формулы (6) получена зависимость для

определения количества незамерзшей воды по величине температурных деформаций образцов грунта.

Список литературы

1. Аксютин О.Е., Казарян В.А., Ишков А.Г., Хлопцов В.Г., Теплов М.К., Хрулев А.С., Савич О.И., Сурин С.Д. Строительство и эксплуатация резервуаров в многолетне-мерзлых осадочных породах. М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2013. 432 с.
2. Гурьянов И.Е. Инженерная геокриология: прочность вечномерзлых грунтов. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2009. 139 с.
3. Шестернев Д.М. Физика, химия и механика мерзлых грунтов: учебное пособие. Чита: Изд-во «Поиск», 2012. 331 с.
4. Пчелинцев А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. М.: Наука, 1964. 260 с.
5. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
6. Кузьмин Г.П. Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов: материалы IX Международного симпозиума (г. Мирный, 3–7 сентября 2011 г.). Якутск, 2011. С. 59–62.
7. Кузьмин Г.П. «Способ определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах». Патент № 2592915 Российская Федерация, МПК *F 25D A01J* Заявитель и патентообладатель Учреждение РАН Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (RU). Оpubл. 6 июля 2016 г.
8. Истомин В.А., Чувиллин Е.М., Буханов Б.А. Ускоренный метод оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2017. т. XX I. № 6. С. 134–139.
9. Старостин Е.Г. Определение количества незамерзшей воды о кинетике кристаллизации // Криосфера Земли. 2008. т. XII. № 2. С. 60–64.