

УДК 622.271.7:51

ГРАФИЧЕСКОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ВЗАИМОСВЯЗИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ

Кузьмин Г.П.

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

Выполнен анализ зависимости между показателями физических свойств грунтов, дается сравнение ее с известными приближенными формулами. Полученная зависимость позволяет определять по найденным значениям влажности и плотности грунта относительное содержание воздуха в грунтах, пористость грунта, полную влагоемкость и степень заполнения пор водой и льдом. Установлено, что при одинаковых значениях влажности и плотности наибольшее количество воздуха содержится в талых грунтах, наименьшее в мерзлых и промежуточное количество в промерзающих и протаивающих грунтах. Соответственно изменяется величина полной влагоемкости грунта. Пористость не зависит от теплового состояния грунта. Показано, что в связи с незначительной разностью плотности минеральных частиц различных типов грунтов для практических целей можно принять среднее их значение. Тогда графическое представление показателей физических свойств позволяет определять для мерзлых и талых грунтов относительное содержание воздуха, пористость, полную влагоемкость и степень заполнения пор водой и льдом.

Ключевые слова: грунты мерзлые и талые, показатели свойств, взаимосвязь

GRAPHICAL REPRESENTATION OF THE SOIL PHYSICAL PROPERTIES RELATIONSHIP

Kuzmin G.P.

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

This study analyses the relationship among the physical index properties of soils and compares it with the known approximate equations. The relationship obtained can be used to predict relative gas content in soils, soil porosity, specific retention, and degree of saturation with unfrozen water and ice from the found values of soil moisture content and density. The study indicates that at the same moisture contents and densities, the amount of gases is greatest in unfrozen soils and lowest in frozen soils, with intermediate values in freezing and thawing soils. The values of specific retention change correspondingly. Soil porosity is independent of the thermal state of a soil. As particle density varies little between soil types, its average value can be used for practical purposes. Then, the graphical presentation of the physical properties provides an aid in determining the relative gas content, porosity and specific retention for frozen, unfrozen soils and degree of saturation with unfrozen water and ice from the found values of soil.

Keywords: frozen and thawed soils, index properties, relationship

Дисперсные грунты представляют собой, как известно, многокомпонентные и многофазные системы, состоящие из минеральных частиц, поры между которыми заполнены воздухом и водой в различных видах и состояниях. Изменения относительного содержания компонентов при промерзании, оттаивании и изменении влажности влияют на физико-механические, электрические, химические и другие свойства дисперсных грунтов. Поэтому изучение взаимосвязи между показателями физических свойств грунтов имеет теоретическое и практическое значение. Получена наиболее общая зависимость между ними.

Цель работы. Графически представить количественные соотношения между показателями физических свойств дисперсных грунтов различной влажности.

Анализ зависимости показателей физических свойств грунтов

Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов, отражающих их состав и состояние, выражается зависимостью [1, 2]

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

где V и V_a – объем грунта и воздуха в грунте; ρ_d, ρ_s, ρ_w и ρ_i – плотность соответственно сухого грунта, минеральных частиц, воды и льда; w и w_w – суммарная влажность и влажность по незамерзшей воде.

Зависимость (1) можно представить в виде

$$\rho_d = \frac{\rho_s \rho_i \rho_w \left(1 - \frac{V_a}{V} \right)}{\rho_i \rho_w + \rho_s [w \rho_w + w_w (\rho_w - \rho_i)]}. \quad (2)$$

Выражение (2) при $V_a/V=0$ принимает вид формулы А.М. Пчелинцева [3]

$$\rho_d = \frac{\rho_s \rho_w \rho_i}{\rho_w \rho_i + \rho_s [w \rho_w - w_w (\rho_w - \rho_i)]}, \quad (3)$$

а при $V_a/V=0$ и $w_w=0$ преобразуется в формулу И.Н. Вотякова [4]

$$\rho_d = \frac{\rho_s \rho_w \rho_i}{\rho_w \rho_i + \rho_s \rho_w w}, \quad (4)$$

в которой, приняв $\rho_s = 2,7$, $\rho_w = 1,0$ и $\rho_i = 0,9 \text{ г/см}^3$, он считал возможным определять плотность грунтов по одной только влажности:

$$\rho_d = \frac{2,4}{2,7w + 0,9}. \quad (5)$$

Таким образом, зависимость (1) является общим выражением взаимосвязи показателей физических свойств грунтов.

Сравнение приведенных зависимостей показывает, что при большом содержании воздуха в грунтах и небольшой их влажности формулы (3) и (4) дают более высокие значения ρ_d , чем формула (2). Поэтому И.Н.Вотяков ограничивает применение своей формулы по влажности грунтов: не менее 0,05 – для гравийно-галечниковых грунтов; 0,15 – для песчаных; 0,20 – для песчано-суглинистых и 0,25 д.е. – для глинистых грунтов.

Точность определения плотности грунта по формуле (3), полученной без учета влияния содержания воздуха в грунте, и формуле (4), в которой не учитывается также влияние незамерзшей воды, вполне достаточна для производственных целей. Однако для изучения различных физических процессов в грунтах, происходящих при изменении температуры, необходимо учитывать содержание в них незамерзшей воды и воздуха, влияющих, в частности, на прочностные и деформационные свойства грунтов.

Зависимость (1) характеризует взаимосвязь между показателями физических свойств промерзающих и протаивающих грунтов ($0 < w_w < w$).

При полном замерзании воды в грунтах ($w_w = 0$) она принимает следующий вид:

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_i} \right), \quad (6)$$

а для талых грунтов ($w_w = w$)

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right). \quad (7)$$

Анализ зависимостей (1), (6) и (7) показывает, что при одинаковых значениях w и ρ_d наибольшее количество воздуха содержится в талых грунтах, наименьшее – в мерзлых и промежуточное количество в промерзающих и протаивающих грунтах.

В сухих грунтах ($w = 0$) относительное содержание воздуха, если не учитывать небольшие температурные деформации его

компонентов, определяется, как это следует из (1), (6) и (7), выражением

$$\frac{V_a}{V} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}. \quad (8)$$

Правая часть формулы (8) представляет, как известно, пористость грунта n .

Как видно из (6) и (7), значения V_a/V изменяются от величины, равной n при $w = 0$ до 0 при $w = w$.

При $V_a/V = 0$ влажность в зависимостях (1), (6) и (7) равна полной влагоемкости грунта w_n и определяется соответственно выражениями:

при $0 \leq w_w < w$

$$w_n = \rho_i \left[\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} + w_w \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \right], \quad (9)$$

при $w_w = 0$

$$w_n = \rho_i \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right), \quad (10)$$

при $w_w = w$

$$w_n = \rho_w \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right). \quad (11)$$

Из сравнения (9) – (11) следует, что при одинаковых величинах ρ_d и ρ_s полная влагоемкость имеет наибольшее значение в талых, наименьшее – в мерзлых и промежуточное – в промерзающих и протаивающих грунтах.

Плотности минеральных частиц разных типов грунтов различаются незначительно и в среднем составляют для песка 2,66, супеси 2,7, суглинка 2,71 и глины 2,74 г/см³ [4]. Для расчетов большинства практических задач можно принять $\rho_d = 2,7$, $\rho_w = 1,0$ и $\rho_i = 0,92 \text{ г/см}^3$. Тогда для оперативного определения n , V_a/V , w_n и S_r по экспериментально найденным значениям ρ_d и w можно использовать графики зависимостей V_a/V и S_r от w при различных значениях ρ_d . Однако при $0 < w_w < w$ требуется большое количество графиков для разных значений влажности по незамерзшей воде, а определение w_w в полевых условиях не представляется возможным. Поэтому построение графиков V_a/V и S_r от w для промерзающих и протаивающих грунтов нецелесообразно.

Прочностные и деформационные свойства мерзлых грунтов в значительной мере зависят от степени заполнения пор незамерзшей водой и льдом, выражаемой отношением

$$S_r = \frac{V_w + V_i}{V_n}, \quad (12)$$

где V_w , V_i и V_n – объемы незамерзшей воды, льда и пор.

Эти объемы равны:

$$V_w = \frac{w_w \rho_d V}{\rho_w}, \quad V_i = \frac{(w - w_w) \rho_d V}{\rho_i}, \quad V_n = V - V_d = V \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right), \quad (13)$$

подставив которые в (12), получим:

– для промерзающих и протаивающих грунтов ($0 < w_w < w$)

$$S_r = \frac{\rho_d \rho_s [w \rho_w - w_w (\rho_w - \rho_i)]}{\rho_w \rho_i (\rho_s - \rho_d)}; \quad (14)$$

– для мерзлых грунтов ($w_w = 0$)

$$S_r = \frac{\rho_d \rho_s w}{\rho_i (\rho_s - \rho_d)}; \quad (15)$$

– для талых грунтов ($w_w = w$)

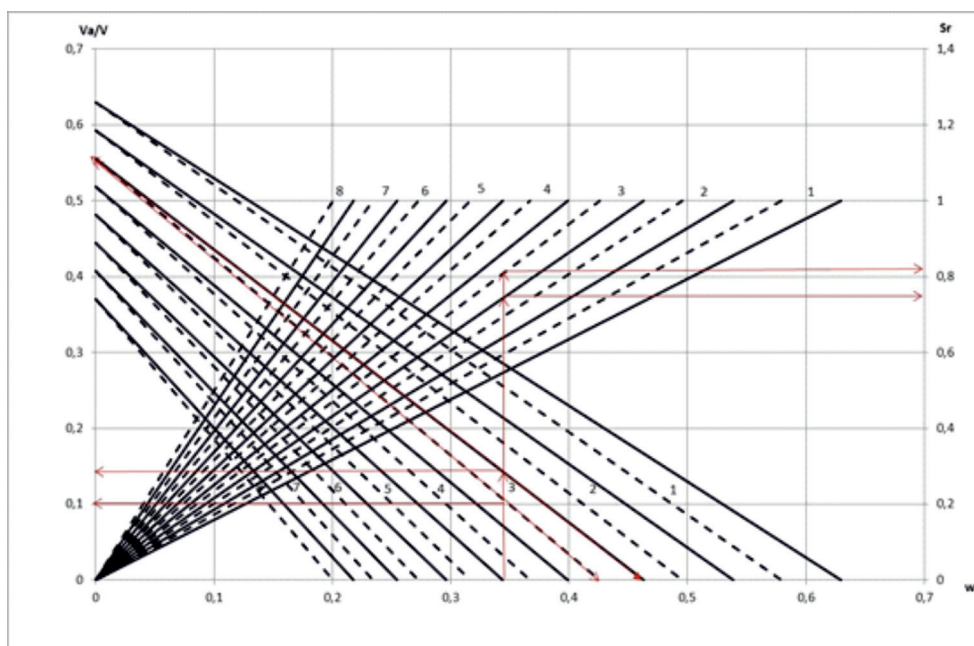
$$S_r = \frac{\rho_d \rho_s w}{\rho_w (\rho_s - \rho_d)}. \quad (16)$$

Значения S_r изменяются от 0 при $w = 0$ до 1 при $w = w_n$.

Из сравнения выражений (14), (15) и (16) видно, что при одинаковых влажности и плотности грунта степень заполнения пор водой, льдом и незамерзшей водой наибольшая в мерзлых грунтах, наименьшая – в талых.

Графическое представление взаимосвязи показателей физических свойств грунтов

На рисунке представлены графики зависимости V_d/V и S_r от w при значениях ρ_d от 1,0 до 2,0 г/см³ для мерзлых и талых грунтов, из которых видно, что содержание воздуха и степень заполнения пор льдом и водой зависят от влажности и состояния поровой воды.



Взаимосвязь показателей физических свойств талых (сплошные) и мерзлых (штриховые) грунтов при $\rho_s = 2,7 \text{ г/см}^3$; 1 – $\rho_d = 1,0$; 2 – $\rho_d = 1,1$; 3 – $\rho_d = 1,2$; 4 – $\rho_d = 1,3$; 5 – $\rho_d = 1,4$; 6 – $\rho_d = 1,5$; 7 – $\rho_d = 1,6$; 8 – $\rho_d = 1,7 \text{ г/см}^3$

При увеличении влажности грунта относительное содержание воздуха уменьшается от максимального при $w = 0$, равного пористости грунта, до 0 при полной влагоемкости, причем в мерзлых грунтах оно меньше, чем в талых. Разность между ними с увеличением влажности возрастает.

В соответствии с графиками значения показателей физических свойств грунтов определяются следующим образом. По известным значениям w и ρ_d на наклонных прямых $V_d/V - w$ и $S_r - w$ следует найти точ-

ки, ординаты которых равны значениям V_d/V и S_r . Пересечение наклонных прямых $V_d/V - w$ с осью ординат дает значение пористости грунта, а пересечения их с осью абсцисс – значения полной влагоемкости талого и мерзлого грунта.

Заключение

В работе выполнен анализ зависимости показателей физических свойств грунтов при критических значениях w и w_w , характеризующих различный количественный со-

став поровой воды и ее состояние в грунте. При $w = 0$ относительное содержание воздуха равно пористости грунта n , т.е. поры заполнены только воздухом. При $V_a/V = 0$ поры полностью заполнены льдом и водой, а влажность грунта соответствует полной влагоемкости w_n . Причем полная влагоемкость мерзлых, промерзающих, протаивающих и талых грунтов различная и возрастает от мерзлых грунтов к талым.

Для определения относительного содержания воздуха V_a/V , пористости грунта n , полной влагоемкости талых $w_{n,th}$ и мерзлых $w_{n,f}$ грунтов и степени заполнения пор водой и льдом S_r требуются следующие экспериментальные и справочные данные:

– в области фазовых переходов воды ($0 < w_w < w$) – $w, w_w, \rho_d, \rho_s, \rho_w$ и ρ_i ;

– в области замерзшего состояния поровой воды в грунте ($w_w = 0$) – w, ρ_d, ρ_s и ρ_i ;

– в талых грунтах ($w_w = w$) – w, ρ_d, ρ_s и ρ_w .

Однако из них значения ρ_w и ρ_i являются справочными данными, а ρ_s можно принять одинаковой для всех типов грунтов.

Таким образом, графическое представление зависимости между показателями физических свойств грунтов по двум экспериментальным величинам ρ_d и w позволяет оперативно найти пористость грунта, относительное содержание воздуха в грунте, полную влагоемкость и степень заполнения пор водой или льдом.

Список литературы

1. Кузьмин Г.П. Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов // Материалы IX Международного симпозиума «Проблемы инженерного мерзлотоведения». (Мирный, 3–5 сент. 2011 г.). – Якутск, 2011. – С. 59–62.

2. Кузьмин Г.П. Анализ зависимости показателей физических свойств грунтов // Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 11. – С. 28–29.

3. Пчелинцев А.М. Строение и физико-механические свойства мерзлых грунтов. – М.: Наука, 1964. – 260 с.

4. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. – Новосибирск: Наука, 1975. – 176 с.

5. Сергеев Е.М., Глодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Осипов В.И. и др. Грунтоведение. – М.: Изд-во Моск.ун., 1971. – 595 с.

References

1. Kuzmin G.P. Relationship among the physical properties of soils. In: Permafrost Engineering, Proceedings of the IX International Symposium, 3-7 September 2011, Mirny, Russia (ed. R.V. Zhang). Yakutsk: Melnikov Permafrost Institute SB RAS Press, 2011, pp. 59–62.

2. Kuzmin G.P. 2010. Analysis of relationships among physical index properties. J. Promyshlennoe Grazhdanskoe Stroitel'stvo 11:28–29. (in Russian).

3. Pchelintsev A.M. Structure and Physical and Mechanical Properties of Frozen Soils. Moscow: Nauka, 1964. 260 p.

4. Votyakov I.N. Physical and Mechanical Properties of Frozen and Thawing Soils in Yakutia. Novosibirsk: Nauka, 1975. 176 p.

5. Sergeev E.M., Glodkovskaya G.A., Ziangirov R.S., Osipov V.I. et al. Soil Engineering. Moscow: Moscow State University Press, 1971. 595 p.

Рецензенты:

Чжан Р.В., д.т.н., академик РИА, советник лаборатории инженерной геокриологии Института мерзлотоведения СО РАН, г. Якутск;

Омельяненко А.В., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Института мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск.

Работа поступила в редакцию 07.08.2014.