

3. Малафеев Ю.М., Кряжмский Ф.В., Добринский Л.М. Анализ популяции рыси Среднего Урала. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1986. – 105 с.

4. Sarah K. Haas, Virginia Hayssen and Paul R. Krausman *Panthera leo*. – 2005. MAMMALIAN SPECIES. – № 762. – P. 1–11.

5. Боескоров Г.Г., Барышников Г.Ф. Позднечетвертичные хищные млекопитающие Якутии. – СПб.: Наука, 2013. – 199 с.

6. Верецагин Н.К. Пещерный лев и его история в Голарктике и в пределах СССР // Тр. ЗИН АН СССР. – 1971. – Т.19. – С. 123–199.

7. Верецагин Н.К. Млекопитающие Кавказа. История формирования фауны. – М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1959. – 703 с.

8. Каталог млекопитающих СССР (плиоцен-современность) / Под ред. И.М. Громова, Г.И. Барановой. – Л.: Наука, 1981. – 465 с.

9. Baryshnikov G., Boeskorov G. The Pleistocene cave lion, *Panthera spelaea* (Carnivora, Felidae) from Yakutia, Russia // *Cranium*. – 2001. – V. 18, №1. – P. 7–24.

10. Боескоров Г.Г., Белолюбский И.Н., Плотников В.В., Давыдов С.П., Лазарев П.А., Орлова Л.А., Степанов А.Д., Барышников Г.Ф. Новые находки ископаемого пещерного льва на территории Якутии // Наука и образование. – 2012. – № 2. – С. 45–51.

Поступила в редакцию 10.05.2016

УДК 622.271.7:51

Пределы изменения показателей физических свойств грунтов

Г.П. Кузьмин

Институт мерзлотоведения им. П.И Мельникова СО РАН, г. Якутск

Отмечено, что дисперсные грунты являются многофазными многокомпонентными системами. Число фаз и количество компонентов зависят от степени заполнения пор водой и ее состояния, определяющих значения показателей физических свойств грунтов, в свою очередь влияющих на теплофизические, прочностные, деформационные и другие свойства грунтов. Указано, что при изучении физических свойств грунтов определяют четыре величины – массу и объем образца в естественном состоянии, массу высушенного образца и объем твердых частиц, позволяющих находить основные показатели. Рассматриваются закономерности изменения основных показателей физических свойств грунтов на основе известных положений о том, что повышение влажности грунтов до полного заполнения пор водой не приводит к увеличению их объема, предельной влажностью талых грунтов является полная влагоемкость, а мерзлые грунты вследствие миграции влаги при промерзании могут иметь влажность, значительно превышающую полную влагоемкость. Приведены формулы расчета массы грунта при изменении влажности и объема мерзлого грунта в диапазоне влажности, превышающей полную влагоемкость, с использованием которых получены формулы определения показателей плотности, пористости и коэффициента водонасыщения. Кроме того, на основе ранее полученной формулы взаимосвязи показателей физических свойств грунтов показана зависимость содержания газов от влажности. Построены графики зависимости показателей физических свойств образца суглинка от влажности, которые можно рассматривать как качественно общими для всех типов грунтов. В диапазоне влажности от 0 до полной влагоемкости линейно увеличиваются плотность грунта от величины, равной плотности скелета до максимального значения и коэффициент водонасыщения от 0 до 1, а относительное содержание газов уменьшается также по линейному закону от значения, равного пористости, до 0. При превышении влажности мерзлого грунта полной влагоемкости плотность грунта и скелета грунта уменьшаются по затухающей кривой, пористость и коэффициент пористости возрастают, коэффициент водонасыщения остается равным 1, а относительное содержание газов – 0.

Ключевые слова: грунт, мерзлый и талый, влажность, показатели, взаимосвязь.

Ranges of Change of Soils Physical Properties Indices

G.P. Kuzmin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

Dispersive soils are multi-phase, multi-component systems. The number of phases and components depends on the amount and state of water in soil voids determining the values of index physical properties, which in turn affect the thermal, strength, deformation and other properties of the soil. Studies of soil physical properties involve the determination of four values – the mass and volume of a sample in a natural state, the mass of a dried sample, and the volume of solids which are used to determine the main parameters. This study examines variations in the main indices of soil physical properties based on the known provisions that an increase in soil moisture content to complete saturation does not lead to an increase in soil volume and that full moisture capacity for thawed soils is maximum moisture content, while frozen soils may have moisture contents far in excess of full moisture capacity due to moisture migration. Formula are presented to calculate the mass of soil with a change in moisture content and the volume of frozen soil in the range of moisture contents exceeding the full capacity, from which formula have been derived for determining the density, porosity and degree of saturation. Also, a relation is shown to exist between gas and moisture contents based on the formula obtained earlier relating the physical index properties of soils. Graphs have been derived relating the index physical properties of a clay silt specimen to moisture content, which are thought to be qualitatively common for all soil types. In the moisture content range from 0 to full capacity, soil density increases linearly from the value equal to dry density to the maximum value and the degree of saturation increases linearly from 0 to 1, while the relative gas content decreases linearly from the value equal to porosity to 0. When the moisture content of frozen soil exceeds the full capacity, bulk density and dry density decrease as an attenuating curve, porosity and void ratio increase, the degree of saturation remains at 1, and the relative gas content is 0.

Key words: soil, frozen and thawed, moisture content, parameters, relationship.

Введение

Дисперсные грунты являются, как известно, многофазными многокомпонентными системами, состоящими в общем случае из твердых частиц, воды в различных видах и состояниях и газов. Число фаз и количество компонентов зависят от степени заполнения пор водой и ее состояния. Талые грунты с неполным заполнением пор водой относятся к трехфазным трехкомпонентным системам, а водонасыщенные – к двухфазным двухкомпонентным. Мерзлые неводонасыщенные грунты, которые в природных температурных условиях всегда содержат некоторое количество незамерзшей воды, являются трехфазными четырехкомпонентными системами, а при полном заполнении пор водой и льдом – двухфазными трехкомпонентными. Такие изменения числа фаз и количества и соотношения компонентов обуславливают различие теплофизических, электрических, прочностных, деформационных и других свойств одного и того же типа грунта. Поэтому изучение изменения и взаимосвязи показателей физических свойств дисперсных грунтов имеет научное и практическое значение.

Основные показатели физических свойств грунтов

К показателям физических свойств грунтов отнесены не только характеристики этих свойств – плотности грунта, скелета, твердых

частиц, влажность, пористость, коэффициент пористости и полная влагоемкость, но и коэффициент водонасыщения и относительное содержание газов.

Для определения основных показателей физических свойств грунтов необходимо и достаточно экспериментально найти четыре величины – массу m и объем V грунта, массу сухого грунта m_d и объем твердых частиц V_d . Эти величины позволяют определять расчетным путем:

– *плотность грунта* – массу грунта в единице его объема

$$\rho = \frac{m}{V}; \quad (1)$$

– *плотность скелета грунта* – массу высушенного грунта в единице начального объема

$$\rho_d = \frac{m_d}{V}; \quad (2)$$

– *плотность твердых частиц* – массу твердых частиц в единице объема этих частиц

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

– *влажность* – отношение массы воды в грунте к массе высушенного грунта

$$w = \frac{m - m_d}{m_d}; \quad (4)$$

– *пористость* – отношение объема пор к начальному объему грунта

$$n = \frac{V - V_d}{V}, \quad (5)$$

которая после подстановки выражений V из (2) и V_d из (3) принимает вид

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}; \quad (6)$$

– *коэффициент пористости* – отношение объема пор к объему твердых частиц

$$e = \frac{V - V_d}{V_d}, \quad (7)$$

который после подстановки выражений V из (2) и V_d из (3) принимает вид

$$e = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_d}; \quad (8)$$

– *полная влагоемкость* – отношение массы воды при полном заполнении пор к массе сухого грунта

$$w_n = \frac{(V - V_d)\rho_w}{m_d}, \quad (9)$$

принимающая при подстановке выражений V из (2) и V_d из (3) следующий вид

$$w_n = \frac{(\rho_s - \rho_d)\rho_w}{\rho_s\rho_d}, \quad (10)$$

где ρ_w – плотность воды;

– *коэффициент водонасыщения* – отношение объема воды в грунте к объему пор

$$S_r = \frac{m_d w}{\rho_w (V - V_d)}, \quad (11)$$

который после подстановки выражений V из (2) и V_d из (3) принимает вид

$$S_r = \frac{\rho_s \rho_d w}{\rho_w (\rho_s - \rho_d)}. \quad (12)$$

– *относительное содержание газов* – отношение объема газов к объему пор.

Влияние влажности на показатели физических свойств грунтов

Рассмотрим влияние влажности на показатели физических свойств грунтов при $0 \leq w \leq w_n$ (диапазон 1) и при $w \geq w_n$ (диапазон 2). Показатели в диапазоне 1 обозначим индексом «1», а в диапазоне 2 – индексом «2».

Точное определение полной влагоемкости расчетным путем представляется затруднительным из-за разной плотности связанной и свободной воды в талых грунтах и льда, связанной и свободной воды в мерзлых грунтах. Однако небольшое количество связанной воды относительно свободной при полном заполнении ими

пор плотность заполнителя можно принять равной в талых грунтах плотности свободной воды, а в мерзлых грунтах плотности льда. При таком допущении полная влагоемкость в талых грунтах $w_{n,th}$ определяется по формуле (10). В мерзлых грунтах при достаточно низких температурах, различных для разных типов грунтов, когда можно принять, что вся вода замерзла, полную влагоемкость приближенно можно определить по формуле

$$w_{n,f} = \frac{(\rho_s - \rho_d)\rho_i}{\rho_s\rho_d}, \quad (13)$$

где ρ_i – плотность льда.

В диапазоне влажности 1 из четырех величин – m, V, m_d и V_d изменяется m грунта с сохранением величины его объема.

Зависимость (4) представим в виде

$$m = m_d(1 + w). \quad (14)$$

Подставив в (14) выражения m из (1) и m_d из (2), находим

$$\rho_1 = \rho_{d,1}(1 + w), \quad (15)$$

из которой видно, что ρ_1 зависит от w линейно и при повышении влажности возрастает от $\rho_1 = \rho_{d1}$ при $w = 0$ до максимального значения $\rho_{1,max} = \rho_{d,1}(1 + w_n)$ при $w = w_n$.

Значения $\rho_{d1}, \rho_{s1}, n_1$ и e_1 в этом диапазоне влажности, рассчитываемые как для талых, так и мерзлых грунтов по формулам (2), (3), (6) и (8), не изменяются.

Коэффициент водонасыщения в диапазоне 1 влажности определяется в талых грунтах $S_{r,th}$ по формуле (12), в мерзлых – по формуле

$$S_{r,f} = \frac{\rho_s \rho_d w}{\rho_i (\rho_s - \rho_d)}. \quad (16)$$

В диапазоне 2 естественная влажность талых грунтов не превышает их полной влагоемкости, а мерзлые грунты в результате миграции влаги в процессе промерзания могут иметь $w > w_n$ [1]. Масса мерзлых грунтов при этом возрастает и определяется по формуле (14), а объем складывается из двух частей

$$V_2 = V_1 + \Delta V, \quad (17)$$

где $V = \frac{m_d}{\rho_{d,1}}$ – объем грунта в диапазоне 1; $\rho_{d,1}$

– плотность скелета грунта в диапазоне 1;

$\Delta V = \frac{m_d (w - w_{n,f})\rho_i}{\rho_i}$ – увеличение объема

грунта за счет приращения массы воды в диапазоне 2.

Плотность мерзлых грунтов в диапазоне влажности 2 вследствие увеличения их массы и объема на основании (1), (14) и (17) уменьшается и определяется формулой

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

В мерзлых грунтах при $w \geq w_{n,f}$ плотность скелета уменьшается и на основании (2) и (17) определяется формулой

$$\rho_{d,2,f} = \frac{\rho_{d,1}\rho_i}{\rho_i + \rho_{d,1}(w-w_{n,f})}. \quad (19)$$

Пористость мерзлых грунтов при $w \geq w_{n,f}$ уменьшается и на основании (6) и (19) определяется формулой

$$n_{2,f} = 1 - \frac{1}{\rho_s} \left[\frac{\rho_{d,1}\rho_i}{\rho_i + \rho_{d,1}(w-w_{n,f})} \right]. \quad (20)$$

Коэффициент пористости мерзлых грунтов в диапазоне влажности 2 в результате увеличения объема грунта и соответственно уменьшения $\rho_{d,2,f}$ падает и на основании (8) и (19) определяется формулой

$$e_{2,f} = \rho_s \left[\frac{\rho_i + \rho_{d,1}(w-w_{n,f})}{\rho_{d,1}\rho_i} \right]. \quad (21)$$

В диапазоне 2 в мерзлых грунтах ρ_s и S_r остаются неизменными.

На примере образца суглинка с параметрами: $m=65$ г; $m_d=54,2$ г; $V_l=38,7$ г; $V_d=20,1$ см³ на рис.1 показаны закономерности изменения ρ, ρ_d, n и e при изменении влажности в талом и мерзлом состояниях.

Одним из показателей физических свойств грунтов является также относительное содержание в них газов, которое в диапазоне влажности 1 выражается зависимостью [2]

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left[\frac{1}{\rho_i} + \frac{w_w}{\rho_w} + \frac{w-w_w}{\rho_i} \right], \quad (22)$$

где w_w – влажность по незамерзшей воде.

Зависимость (22) характеризует взаимосвязь между показателями физических свойств промерзающих и протаивающих грунтов ($0 \leq w_w \leq w$). По сравнению с известными формулами А.М. Пчелинцева [3] и И.Н. Вотякова [1] она является более общей.

При допущении полного замерзания воды в грунтах ($w_w = 0$) зависимость (22) принимает следующий вид:

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_i} \right), \quad (23)$$

а для талых грунтов ($w_w = w$)

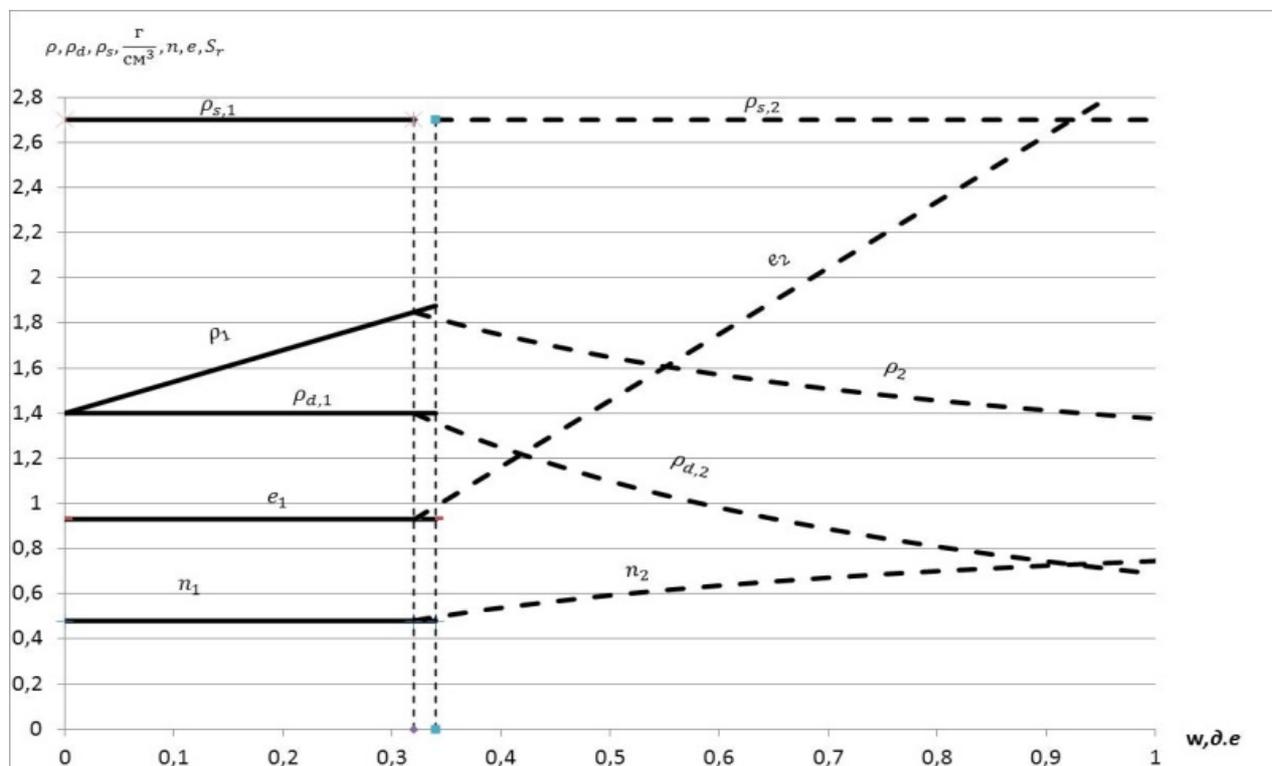


Рис. 1. Зависимости показателей физических свойств образца суглинка от влажности ($m=65,0$ г; $m_d=54,2$ г; $V_l=38,7$ см³; $V_d=20,1$ см³): сплошная линия – талый грунт; штриховая – мерзлый грунт

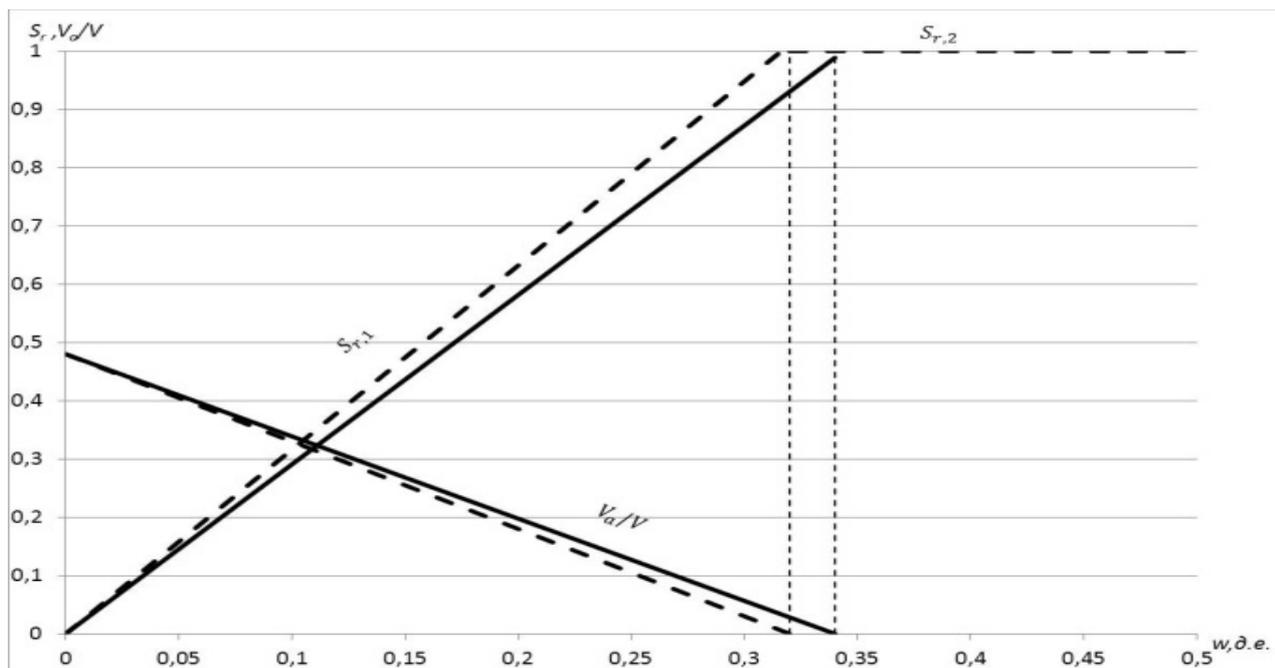


Рис. 2. Зависимости коэффициента водонасыщения и относительного содержания газов от влажности образца суглинка ($m=65,0$ г; $m_d=54,2$ г; $V_i=38,7$ см³; $V_d=20,1$ см³): сплошная линия – талый грунт; штриховая – мерзлый грунт

$$\frac{V_a}{V} = 1 - \rho_d \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{w}{\rho_w} \right). \quad (24)$$

В сухих грунтах ($w=0$) относительное содержание газов, если не учитывать небольшие температурные деформации его компонентов, определяется, как это следует из (22), (23) и (24), выражением

$$\frac{V_a}{V} = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}. \quad (25)$$

Правая часть формулы (24) равна, как известно, пористости грунта n .

При $V_a/V=0$ влажность в зависимостях (22), (23) и (24) соответствует полной влагоемкости грунта w_n и определяется соответственно выражениями:

при $0 < w_w < w$

$$w_n = \rho_i \left[\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} + w_w \left(\frac{1}{\rho_i} - \frac{1}{\rho_w} \right) \right], \quad (26)$$

при $w=0$

$$w_n = \rho_i \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right), \quad (27)$$

при $w_w = w$

$$w_n = \rho_w \left(\frac{1}{\rho_d} - \frac{1}{\rho_s} \right). \quad (28)$$

Из сравнения (26)–(28) следует, что при одинаковых величинах ρ_d и ρ_s полная влагоемкость имеет наибольшее значение в талых, наимень-

шее – в мерзлых и промежуточное – в промерзающих и протаивающих грунтах.

На рис.2 представлены графики зависимости и V_a/V от w для образца мерзлого и талого суглинка из приведенного выше примера. При увеличении влажности грунта от $w=0$ до $w=w_n$ коэффициент водонасыщения и относительное содержание газов и в талых и мерзлых грунтах изменяются по линейному закону.

Коэффициент водонасыщения в диапазоне 1 линейно возрастает от 0 при $w=0$ до 1 при $w=w_{n,th}$ в талых и при $w=w_{n,f}$ в мерзлых грунтах. При $w \geq w_{n,f}$ коэффициент водонасыщения мерзлых грунтов остается равным 1.

Относительное содержание газов в диапазоне влажности 1 линейно уменьшается от величины, равной пористости грунта при $w=0$, до 0 в талых грунтах при $w_{n,th}$, в мерзлых – при $w_{n,f}$. При дальнейшем увеличении влажности относительное содержание газов в мерзлых грунтах остается равным 0.

Выводы

На основе известных положений о зависимости состава и строения порового пространства от влажности и фазового состояния воды обоснованы формулы расчета показателей физических свойств грунтов.

Полную влагоемкость как талых, так и мерзлых грунтов можно отнести к критической влажности. Она является для талых грунтов предельной, а для мерзлых – точкой резких изменений характера зависимостей основных по-

казателей физических свойств. В диапазоне влажности от 0 до полной влагоемкости происходят изменения по линейному закону в определенных пределах плотности грунта, коэффициента водонасыщения и относительного содержания газов. Остальные показатели в этом диапазоне влажности остаются постоянными.

При повышении влажности мерзлых грунтов за пределами полной влагоемкости показатели их плотности уменьшаются, стремясь к определенному пределу, а показатели пористости увеличиваются.

Полученные закономерности распространяются на все типы грунтов и могут быть применены для прогнозирования поведения этих

грунтов при использовании в качестве основания, среды и материала для сооружений.

Литература

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

2. *Кузьмин Г.П.* Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов // Проблемы инженерного мерзлотоведения: Материалы IX Международного симпозиума (3–7 сентября 2011 г., г. Мирный). – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2011. – С 59–63.

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

Поступила в редакцию 12.02.2016

УДК 550.42:546.17(571.56)

Температура начала замерзания засоленных грунтов деятельного слоя в городской среде Якутска

Н.В. Торговкин

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск

Приводится оценка важнейшего инженерно-геологического показателя – температуры начала замерзания грунтового раствора засоленного грунта – T_{bf} . Сравниваются два расчетных метода этого показателя, которые применяются при отсутствии экспериментальных данных. Фактическим материалом послужили засоленные грунты деятельного слоя г. Якутска. Первый метод основан на химическом законе Рауля–Вант-Гоффа, который обусловлен влиянием комплекса солей и вычисляется как сумма температур, второй – на основе действующего СП 25.13330.2012 (Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах) и зависит от вида грунта и концентрации порового раствора. Результаты вычислений показали, что температура начала замерзания, рассчитанная по уравнению Рауля–Вант-Гоффа, во всех случаях оказалась ниже, чем по СП. Разница между этими показателями составляла: в песках в среднем $0,2^{\circ}\text{C}$, в супесях $0,6^{\circ}\text{C}$, а в суглинках около 1°C . Наибольшее различие характерно для поровых растворов грунтов, в химическом составе которых преобладают NaCl и Na_2SO_4 , и присутствуют MgCl_2 и CaCl_2 . При расчете температуры начала замерзания засоленных песков применимы оба расчетных метода. Для засоленных супесей и суглинков в химическом составе которых преобладают хлориды и сульфаты натрия, и, особенно, когда встречаются хлориды магния и кальция, предпочтительнее использовать уравнение Рауля–Вант-Гоффа.

Ключевые слова: засоленность, температура начала замерзания грунта, закон Рауля и Вант-Гоффа, грунтовый раствор.

Freezing Point of Saline Soils of Active Layer in Urban Environment of Yakutsk

N.V. Torgovkin

Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk

The article provides the results of estimation of important geotechnical parameter which is the freezing point of a saline soil solution – T_{bf} . Comparison of two calculation methods for the indicator that are applied