

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЛИЧЕСТВА НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В МЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПО ДЕФОРМАЦИИ ОБРАЗЦА

DETERMINING UNFROZEN WATER CONTENT IN FROZEN SOILS BY MEANS OF SAMPLE DEFORMATION



*Г. П. Кузьмин,
Институт
мерзотоведения
им. П. И. Мельникова
СО РАН, г. Якутск
kuzmin@mpi.ysn.ru*

*G. Kuzmin,
Institute of Permafrost
named after P. I. Melnikov
SB RAS, Yakutsk*



*Ю. Г. Слепцова,
Институт
мерзотоведения
им. П. И. Мельникова
СО РАН, г. Якутск
yulechka_sleptsova@mail.ru*

*Yu. Sleptsova,
Institute of Permafrost
named after P. I. Melnikov
SB RAS, Yakutsk*

Отмечено, что мерзлые грунты являются сложными многокомпонентными многофазными системами, одним из компонентов которых является вода в различных видах и состояниях. Фазовый состав поровой воды определяет физические, физико-механические свойства мерзлых грунтов. Указано, что соотношение незамерзшей воды и льда в порах мерзлых грунтов зависит не только от температуры, но и ряда других факторов, существенно осложняющих изучение фазового состава поровой воды. Отмечены различные экспериментальные методы определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах, которые имеют ряд недостатков, обусловленных сложностью одновременного учета влияния множества факторов, воздействующих на содержание незамерзшей воды в мерзлых грунтах. Разработан принципиально новый метод определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах. Метод основан на известном положении о независимости количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах от их влажности и закономерности деформации водонасыщенного образца грунта в условиях невозможности бокового его расширения при кристаллизации поровой воды.

Описан эксперимент по определению деформации образца грунта при температуре практически полной кристаллизации поровой воды. Представлен расчет деформации этого образца. Сделан вывод, что разница между опытным и расчетным значениями деформации образца не выходит за пределы ошибки измерения. Это позволяет говорить о приемлемости метода для изучения фазового состава воды в мерзлых грунтах в практических целях

Ключевые слова: мерзлый грунт; незамерзшая вода; метод определения; влажность; водонасыщенный грунт; температура; фазовый переход; деформация; эксперимент; расчет

It is noted that frozen soils are complex multicomponent multiphase systems, one of the components of which is water in various types and states. The phase composition of pore water determines physical, physical and mechanical properties of frozen soils. It is indicated that the ratio of unfrozen water and ice in the pores of frozen soils depends not only on temperature, but also on a number of other factors that significantly complicate the study of the phase composition of pore water. Various experimental methods for determining the amount of unfrozen water in frozen soils are noted, which have several disadvantages, due to the complexity of simultaneously considering the influence of many factors affecting the content of unfrozen water in frozen soils. A fundamentally new method for determining the amount of unfrozen water in frozen soils has been developed. The method is based on the well-known position about the independence of the amount of unfrozen water in frozen soils on their humidity and the pattern of deformation of a water-saturated soil sample in the conditions of the impossibility of its lateral expansion during crystallization of pore water.

An experiment is described to determine the deformation of a soil sample at a temperature of almost complete crystallization of pore water. The calculation of the strain of this sample is presented. It was concluded that the

difference between the experimental and calculated values of the sample deformation does not go beyond the limits of measurement error. This suggests the acceptability of the method for studying the phase composition of water in frozen soils for practical purposes

Key words: frozen soil; unfrozen water; determination method; moisture content; saturated soil; temperature; phase change; deformation; experiment; calculation

Введение. Физические и физико-химические процессы, протекающие во влажных дисперсных грунтах при изменении температуры, давления и других параметров, являются чрезвычайно сложными. Это объясняется сложностью влажных дисперсных грунтов по составу, строению и взаимодействию их компонентов и фаз [1; 3; 5; 9].

Мерзлые грунты состоят из скелета, воды в разных состояниях и газообразной составляющей. Скелет мерзлых дисперсных грунтов в подпочвенной части массива включает в основном минеральные частицы и содержит некоторое количество органических веществ. Вода в порах мерзлых грунтов находится в трех фазовых состояниях — твердом, жидком и газообразном. Главными факторами, определяющими количество незамерзшей воды в мерзлых дисперсных грунтах, являются минеральный состав, дисперсность грунта, концентрация растворенных соединений, давление и температура. С повышением степени дисперсности и его минерализации количество незамерзшей воды увеличивается. Поровая вода взаимодействует с минеральными частицами, обладающими свободной поверхностной энергией, и с ионами растворенных в ней солей. Вследствие этого понижается температура ее замерзания, и в мерзлых грунтах почти всегда содержится определенное количество незамерзшей воды. Влияние давления на количество незамерзшей воды в мерзлых дисперсных грунтах весьма существенно, так как возникающие на контактах частиц, особенно угловатых, очень большие давления вызывают плавление льда. Температурная зависимость количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах обусловлена термодинамическим равновесием в них фазового состава воды, т. е. соответствием

каждой температуре определенного количества пара, жидкой фазы воды и льда. Газовая составляющая в мерзлых грунтах находится в свободном, адсорбированном и защемленном состояниях. Свободные газы заполняют часть порового пространства. Их количество зависит от пористости и влажности грунта. Количество адсорбированных газов, удерживаемых поверхностью частиц, зависит от минерального состава, дисперсности и пористости грунтов, а также от содержания в них органических соединений. Защемленные газы заполняют микропоры дисперсных грунтов и удаляются из них с большим трудом.

Интенсивность фазовых переходов воды в мерзлых грунтах в разных диапазонах изменения температуры различна. Н. А. Цытович выделяет область интенсивных фазовых переходов воды, переходную область и область практически замерзшего состояния, границы которых зависят от дисперсности грунта.

Фазовый состав воды в мерзлых грунтах влияет на физические, теплофизические, механические, электрические и другие свойства мерзлых грунтов. Поэтому изучение фазового состава воды в мерзлых грунтах имеет как научное, так и важное практическое значение.

Существуют различные методы определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах, основанные на использовании теплового эффекта фазового перехода воды, адсорбции, криоскопии, ядерно-магнитного резонанса и др. [3; 4; 7; 8; 10–12], которые требуют сложного оборудования и эксперимента, а некоторые из них применимы в определенном диапазоне температур.

Предлагается принципиально новый метод определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах, основанный

на независимости содержания незамерзшей воды от влажности грунта [2] и закономерности деформирования водонасыщенного образца грунта, вызванного объемными изменениями поровой воды в процессе ее кристаллизации. Увеличение объема грунта, поровое пространство которого полностью заполнено водой, равно увеличению объема поровой воды при ее кристаллизации.

Таким образом, объемная деформация водонасыщенного грунта, вызванная замерзанием поровой воды, может служить показателем фазового состава этой воды.

Обоснование метода. Физические свойства мерзлых грунтов характеризуются рядом показателей, взаимосвязь между которыми выражается зависимостью [6]

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

где V_a – объем воздуха в грунте;

V – объем грунта;

ρ_d, ρ_s, ρ_w и ρ_i – плотность скелета грунта, минеральных частиц, воды и льда;

w – влажность грунта;

w_w – влажность грунта по незамерзшей воде.

Количество незамерзшей воды практически не зависит от влажности мерзлых грунтов и определяется степенью дисперсности, температурой и их засоленностью [9]. Это положение позволяет приближенно определять содержание незамерзшей воды испытаниями образцов грунта, в которых поры полностью заполнены водой, т. е. $\frac{V_a}{V} = 0$. В этом случае из зависимости (1) получаем выражение влажности по незамерзшей воде

$$w_w = \frac{\rho_w \rho_i}{\rho_w - \rho_i} \left(\frac{w_n}{\rho_i} + \frac{1}{\rho_s} - \frac{1}{\rho_d} \right), \quad (2)$$

где w_n – влажность водонасыщенного грунта.

Влажность грунта при полной влагоемкости определяется зависимостью

$$w_n = \rho_w \frac{(\rho_s - \rho_{d,0})}{\rho_s \rho_{d,0}}, \quad (3)$$

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 (2) с учетом (3) принимает вид

$$w_w = \frac{\rho_w \rho_i}{\rho_w - \rho_i} \left(\frac{1}{\rho_s} + \frac{\rho_w (\rho_s - \rho_{d,0})}{\rho_i \rho_s \rho_{d,0}} - \frac{S(h_0 + \Delta h)}{m_d} \right), \quad (4)$$

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 (4) 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.

На рисунке показана установка для определения влажности грунта по незамерзшей воде. Образец грунта помещают в металлический стакан и насыщают водой до полного заполнения пор. На образец кладут металлическую пластину.

Стакан с образцом устанавливают на станину и с помощью крепежного устройства закрепляют индикатор часового типа. Собранный таким образом установку помещают в холодильную камеру и при заданной постоянной температуре снимают показание индикатора после прекращения деформации образца.

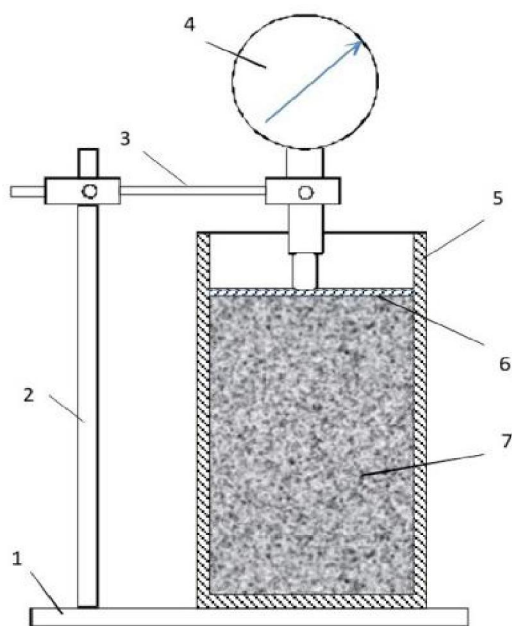


Схема установки для определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах: 1 – станина; 2 – стойка; 3 – устройство для крепления индикатора; 4 – индикатор; 5 – металлический стакан с теплоизоляцией боковых стенок; 6 – металлическая пластина; 7 – образец грунта / Apparatus for determining the unfrozen water content of frozen soils: 1 – bedplate; 2 – stand; 3 – indicator mount; 4 – indicator; 5 – metal container with insulated walls; 6 – metal plate; 7 – soil specimen

Результаты эксперимента и расчета. Для установления возможности применения метода выполнен эксперимент в условиях полной (практически) кристаллизации поровой воды в образце грунта. В этом случае значения приращений высоты образца можно определить:

– по приращению показаний индикатора Δn

$$\Delta h = c \cdot \Delta n, \quad (5)$$

где c – цена деления индикатора;

– по преобразованной при $w_w = 0$ зависимости (4)

$$\Delta h = \frac{m_d}{S} \left[\frac{1}{\rho_s} + \frac{\rho_w (\rho_s - \rho_{d,0})}{\rho_i \rho_s \rho_{d,0}} - \frac{w_w (\rho_w - \rho_i)}{\rho_w \rho_i} \right] - h_0. \quad (6)$$

Образец: песок мелкий, $h_0 = 10,0$ см, $d = 8,0$ см, $m_d = 906,3$ г, $\rho_s = 2,66$ г/см³, $\rho_d = 1,804$ г/см³, $\rho_w = 1,0$ г/см³, $\rho_i = 0,92$ г/см³, $c = 0,01$ мм/дел., температура испытания – $6,5$ °С, при которой поровая вода в песке практически полностью кристаллизуется [2], т. е. можно принять $w_w = 0$.

Величина деформации образца составила по формуле (5) 2,9 мм, по формуле (6) – 2,8 мм, разница между ними равна 3,6 %.

Таким образом, предложенный метод позволяет с достаточной точностью определять количество незамерзшей воды в мерзлых грунтах.

Выводы. 1. Разработан принципиально новый метод определения количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах, основанный на закономерности деформации водонасыщенного образца грунта при кристаллизации поровой воды.

2. Метод опробован при полной кристаллизации поровой воды в образце грунта, который показал его приемлемость для изучения фазового состава воды в мерзлых грунтах.

Список литературы

1. Анисимова П. П. Криогидрохимические особенности мерзлой зоны. Новосибирск: Наука, 1981. 153 с.
2. Вотяков И. П. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 177 с.
3. Ершов Э. Д., Акимов Ю. П., Чеверев В. Г., Кучуков Э. З. Фазовый состав влаги в мерзлых породах. М.: МГУ, 1979. 190 с.
4. Истомин В. А., Чувиллин Е. М., Буханов Б. А. Ускоренный метод оценки содержания незамерзшей воды в мерзлых грунтах // Криосфера Земли. 2017. Т. 21, № 6. С. 134–139.
5. Комаров И. А. Термодинамика и теплообмен в дисперсных мерзлых породах. М.: Научный мир, 2003. 608 с.
6. Кузьмин Г. П. Взаимосвязь показателей физических свойств грунтов // Проблемы инженерного мерзлотоведения: материалы IX Международного симпозиума. Мирный, 2011. С. 59–62.

7. Старостин Е. Г. Определение количества незамерзшей воды по кинетике кристаллизации // Криосфера Земли. 2008. Т. 12, № 2. С. 60–64.
8. Степанов А. В., Тимофеев А. М. Теплофизические свойства дисперсных материалов. Якутск: ЯНЦ СО РАН, 1994. 124 с.
9. Чеверев В. Г. Природа криогенных свойств грунтов. М.: Научный мир, 2004. 234 с.
10. Akagawa S. Experimental study of frozen fringe characteristics // Gold Regions Science and Technology. 1988. Vol. 15. No. 3. P. 209–223.
11. Ishizaki T., Maruyama M., Furukawa Y., Dash J. Premelting of ice in porous silica glass // Journal of Crystal Growth. 1966. No. 162. P. 455–460.
12. Yoshikawa K., Overduin P. P. Comparing unfrozen water content measurements of frozen soil using recently developed commercial sensors // Cold Regions Science and Technology. 2005. No. 42. P. 250–256.

References

1. Anisimova N. P. *Kriogidrohimiicheskie osobennosti merzloy zony* (Cryohydrochemical features of the frozen zone). Novosibirsk: Science, 1981. 153 p.
2. Votyakov I. P. *Fiziko-mehaniicheskie svoystva merzlykh i ottaivayushchih gruntov Yakutii* (Physico-mechanical properties of frozen and thawing soils of Yakutia). Novosibirsk: Science, 1975. 177 p.
3. Ershov E. D., Akimov Yu. P., Cheverev V. G., Kuchukov E. Z. *Fazovy sostav vlagi v merzlykh porodah* (Phase composition of moisture in frozen rocks). Moscow: MGU, 1979. 190 p.
4. Istomin V. A., Chuvilin E. M., Bukhanov B. A. *Kriosfera Zemli* (Earth's Cryosphere), 2017, vol. 21, no. 6, pp. 134–139.
5. Komarov I. A. *Termodinamika i teplomassoobmen v dispersnykh merzlykh porodah* (Thermodynamics and heat and mass transfer in dispersed frozen rocks). Moscow: The Scientific World, 2003. 608 p.
6. Kuzmin G. P. *Problemy inzhenernogo merzlotovedeniya: materialy IX Mezhdunarodnogo simpoziuma* (Problems of engineering permafrost: materials of the IX International Symposium). Mirny, 2011, pp. 59–62.
7. Starostin E. G. *Kriosfera Zemli* (Earth's Cryosphere), 2008, vol. 12, no. 2, pp. 60–64.
8. Stepanov A. V., Timofeev A. M. *Teplofizicheskie svoystva dispersnykh materialov* (Thermophysical properties of dispersed materials). Yakutsk: YCS SB RAS, 1994. 124 p.
9. Cheverev V. G. *Priroda kriogennykh svoystv gruntov* (The nature of the cryogenic properties of soils). Moscow: Scientific world, 2004. 234 p.
10. Akagawa S. *Gold Regions Science and Technology* (Gold Regions Science and Technology), 1988, vol. 15, no. 3, pp. 209–223.
11. Ishizaki T., Maruyama M., Furukawa Y., Dash J. *Journal of Crystal Growth* (Journal of Crystal Growth), 1966, no. 162, pp. 455–460.
12. Yoshikawa K., Overduin P. P. *Cold Regions Science and Technology* (Cold Regions Science and Technology), 2005, no. 42, pp. 250–256.

Коротко об авторах

Кузьмин Георгий Петрович, д-р техн. наук, главный научный сотрудник, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Республика (Саха) Якутия, г. Якутск, Россия. Область научных интересов: изучение физико-механических свойств мерзлых и талых грунтов
kuzmin@mpi.ysn.ru

Слепцова Юлия Григорьевна, ведущий инженер, Институт мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, Республика (Саха) Якутия, г. Якутск, Россия. Область научных интересов: изучение физико-механических свойств мерзлых и талых грунтов
yulechka_sleptsova@mail.ru

Briefly about the authors

Georgiy Kuzmin, doctor of technical sciences, chief researcher, Institute of Permafrost named after P. I. Melnikov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Republic (Sakha) of Yakutia, Yakutsk, Russia. Sphere of scientific interests: physico-mechanical properties of frozen and thawed soils

Yulia Sleptsova, leading engineer, Institute of Permafrost Studies named after P. I. Melnikov, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Republic (Sakha) of Yakutia, Yakutsk, Russia. Sphere of scientific interests: physico-mechanical properties of frozen and thawed soils

Образец цитирования

Кузьмин Г. П., Слепцова Ю. Г. Определение количества незамерзшей воды в мерзлых грунтах по деформации образца // Вестн. Забайкал. гос. ун-та. 2018. Т. 25. № 1. С. 4–9. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-1-4-9.

Kuzmin G., Sleptsova Y. Determining unfrozen water content in frozen soils by means of sample deformation // Transbaikal State University Journal, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 4–9. DOI: 10.21209/2227-9245-2019-25-1-4-9.

Статья поступила в редакцию: 17.04.2018 г.
Статья принята к публикации: 26.12.2018 г.

