

ИЗМЕРЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ НЕЗАМЕРЗШЕЙ ВОДЫ В ПЕНОСТЕКЛЕ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Сергей Васильевич Цыренжапов,
Александр Александрович Гурулев,
Алексей Олегович Орлов
lgc255@mail.ru

Институт природных ресурсов, экологии и криологии СО РАН
Россия, Чита

Актуальность работы обусловлена активным использованием пеностекла как утеплителя в строительстве и, как следствие, требованием исследования его физических свойств в широком интервале температур.

Методика исследования. Выполнено определение количества воды в жидком состоянии в пеностекле при отрицательных температурах методом СВЧ-влагометрии. Данный метод основан на измерении мощности электромагнитного излучения в микроволновом диапазоне, прошедшего через исследуемый образец пеностекла при изменении его температуры. Измерения выполнялись на частоте 10 ГГц.

Цель работы: изучить возможности метода для определения количества влаги в пеностекле в температурном интервале 0...–100 °С.

Результаты. Приведены экспериментальные данные по измерению количества незамерзшей воды в мелкопористом пеностекле в зависимости от температуры. Вода в переохлажденном состоянии имеет ряд аномальных свойств, что необходимо учитывать при использовании увлажненных сред при отрицательных температурах. При расчетах количества воды в образце необходимо учитывать действительную и мнимую части относительной комплексной диэлектрической проницаемости переохлажденной воды в микроволновом диапазоне. Авторы использовали при расчетах количества переохлажденной воды в мелкопористом пеностекле эмпирическую зависимость электромагнитных параметров воды при отрицательных температурах, предложенную соавтором данной статьи А. О. Орловым. В результате эксперимента показано, что некоторое количество воды в исследуемом материале остается в жидком состоянии до температуры –80 °С.

Выводы. Установлено, что основная часть жидкой воды в крупнопористом пеностекле переходит в твердую фазу – лед при температуре, близкой к 0 °С, в мелкопористом этот переход растягивается до –30 °С. Также в цикле охлаждения-нагрева пеностекла был обнаружен гистерезис электромагнитных потерь. Предложенный метод определения переохлажденной воды будет полезен инженерам-строителям при тепловых расчетах зданий и сооружений при использовании пеностекла в качестве утеплительного материала.

Ключевые слова: пеностекло, переохлажденная вода, микроволновый диапазон, область отрицательных температур, СВЧ-влагометрия.

Введение
В 1930-х гг. академиком Китайгородским был создан новый материал на основе вспененного стекла, который получил название пеностекло [1]. Данный материал обладает рядом преимуществ [2, 3], например, он является низкотеплопроводным, из утеплителей самым прочным, химически и биологически стойким, а также морозостойким. Он широко используется в различных строительных отраслях, от строительства жилых и нежилых помещений [3] до строительства дорог [4].

Водопоглощение пеностекла по объему составляет от 0,5 до 6 %, при этом коэффициент теплопроводности изменяется от 0,045–0,085 Вт/(м · К) в сухом состоянии до 0,16 Вт/(м · К) – во влажном [4]. Так как данный материал является пористым, то его теплофизические свойства сильно зависят от концентрации незамерзшей влаги в нем, которая остается в пеностекле и при отрицательных температурах. При строительстве различных объектов необходимо выполнять расчет температурного поля, в том числе и в пеностекле, влажность которого может изменяться и которое подвергается периодическому замораживанию и оттаиванию. Следовательно, при расчетах необходимо учитывать наличие объемной воды в объекте как при положительных, так и при отрицательных температурах и также необходимо учитывать фазовые переходы (вода–лед, лед–вода) в пеностекле, что, в свою очередь, будет влиять на изменения величины теплопроводности [4].

В последние десятилетия выполнены исследования по изучению температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах при их замерзании [5, 6]. Н. А. Цыговичем сформулирован принцип равновесного состояния [7], согласно которому в криогенной породе содержится незамерзшая вода, которая находится при фиксированных параметрах состояния в равновесии со льдом. Показано, что вода в порах может существовать до температур ~ –90 °С [8–10]. Свойства воды при отрицательных температурах слабо изучены и требуют дальнейших исследований [11]. Это связано, в частности, с тем, что у воды при низких температурах наблюдается аномальное поведение физических свойств. Так, при температуре около –45 °С и давлении 101 кПа существует особая точка (λ-точка), в которой физические свойства воды резко изменяются [9, 12].

Для определения количества жидкой воды в пеностекле при отрицательных температурах был использован метод СВЧ-влагометрии [13, 14]. Цель данного исследования – изучить возможности метода для определения количества влаги в пеностекле в температурном интервале 0...–100 °С.

Объект и методика исследования

Проведение экспериментов осуществлялось на образце пеностекла с мелкими порами размером до 0,1 мм и плотностью 450 кг/м³. Фотография исследуемого пеностекла показана на рис. 1. Выделенный фрагмент поверхности исследуемого пеностекла соответствует поре с размером 90 мкм.

Суть метода СВЧ-влагометрии заключается в определении величины электромагнитных потерь при прохождении СВЧ-излучения через образец. Ввиду существенного различия диэлектрических характеристик воды и сухого материала небольшие концентрации воды в увлажненной среде будут заметно уменьшать мощность проходящего электромагнитного излучения. Так, например, на частоте 10 ГГц мнимая и действительная части комплексной диэлектрической проницаемости сухого образца пеностекла и воды отличаются приблизительно в 40 и 4000 раз соответственно. По величине потерь можно судить о количестве воды в исследуемом образце. Бесконтактность,

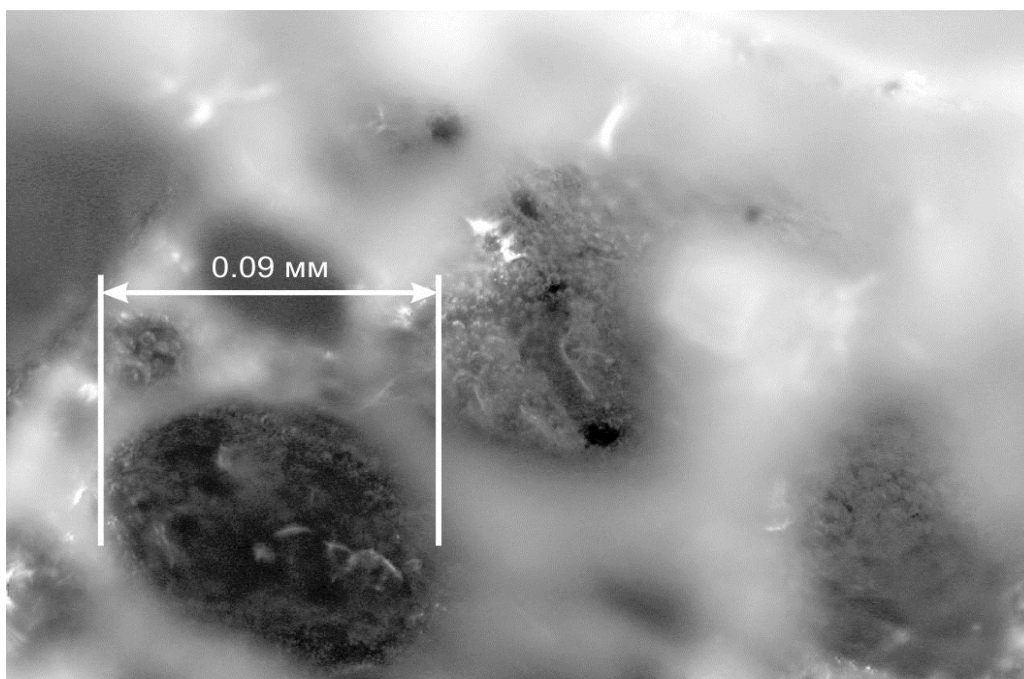


Рисунок 1. Фотография поверхности образца пеностекла под микроскопом.
Figure 1. The photograph of the surface of the cellular glass sample in the microscope.

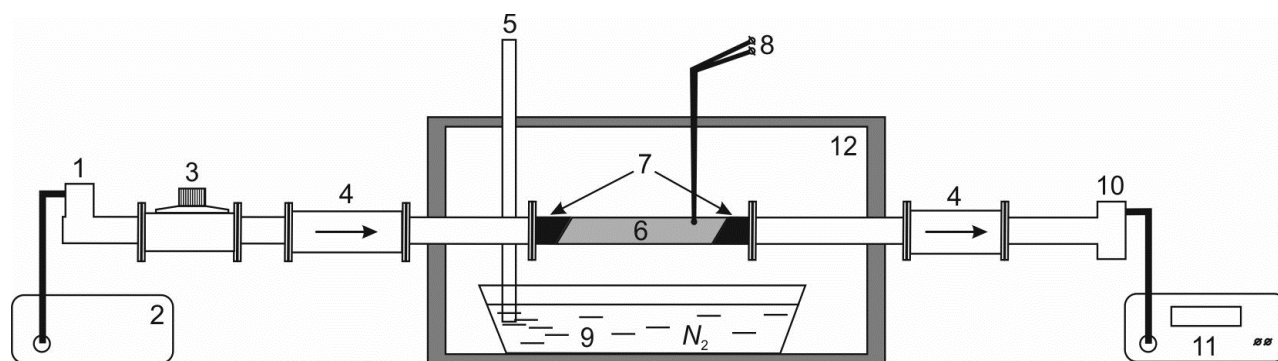


Рисунок 2. Схема измерительной установки для определения электромагнитных потерь в увлажненном материале. 1 – СВЧ-генератор; 2 – блок питания; 3 – аттенуатор; 4 – вентиль; 5 – трубка ввода жидкого азота; 6 – исследуемый образец пеностекла; 7 – переходники для согласования; 8 – термопара; 9 – емкость с жидким азотом; 10 – СВЧ-детектор; 11 – система сбора данных, 12 – термокамера.
Figure 2. The scheme of a potential circuit for determining electromagnetic losses in a moistened material.

высокая чувствительность к низкому содержанию воды и высокая скорость измерений – основные достоинства данного способа.

Для измерения содержания незамерзшей воды использовалась установка, схема которой приведена на рис. 2. Измерения выполнялись на частоте 10 ГГц. Генератор на диоде Ганна (1) со средней частотой генерации 10 ГГц создавал электромагнитное излучение, которое проходило через аттенуатор (3) для регулирования мощности излучения, СВЧ-вентиль (4), согласующий переходник (7), и поступало в СВЧ-тракт прямоугольного сечения, где располагался исследуемый образец, который охлаждался парами азота. Далее электромагнитное излучение попадало на СВЧ-детектор (10), и проходящая мощность электромагнитного излучения фиксировалась с помощью системы сбора информации фирмы Agilent (11). Температура образца определялась с использованием термопары типа «J» (8). Для температурной стабилизации исследуемого материала использовалась термокамера.

Для определения весовой влажности образца применялся термостатно-весовой способ. Процедура приготовления образца включала в себя следующие этапы: 1 – из листов пеностекла вырезались заготовки длиной 2 см; 2 – они высушивались при температуре +110 °С в течение суток; 3 – высушенные образцы выдерживались в дистиллированной воде при температуре +25 °С в течение 30 ч. Далее проводили их охлаждение с последующим нагреванием.

Результаты измерений и их обсуждение

График изменения проходящей мощности P микроволнового излучения через пеностекло с весовой влажностью 1,7 % при его нагревании после предварительного охлаждения на частоте 10 ГГц приведен на рис. 3.

Как видно из данного графика, существуют температурные области, которые подразумевают следующее поведение мощности излучения, проходящего через исследуемый образец. Первая область: при температуре выше T_1 характеризуется значительными потерями мощности электромагнитной волны в образце, что связано с большим количеством

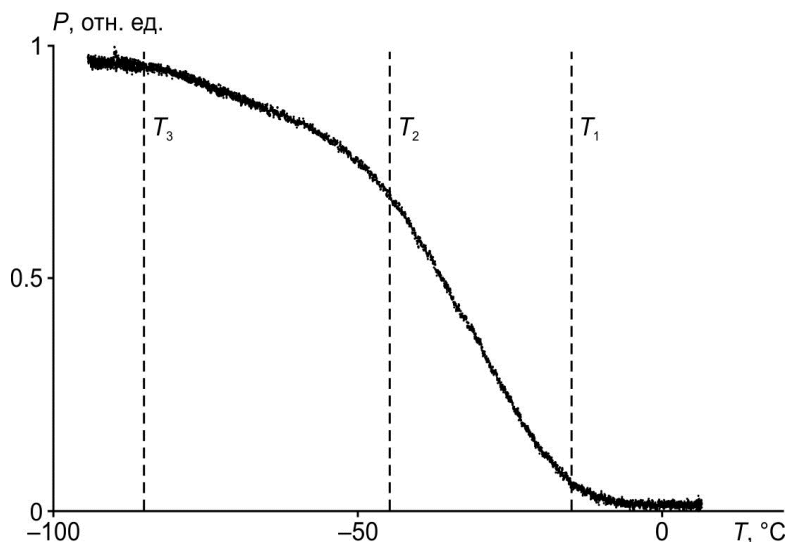


Рисунок 3. Изменение мощности микроволнового излучения в относительных единицах, проходящего через образец пеностекла с размерами пор до 0,1 мм на частоте 10 ГГц от его температуры T при нагревании.

Figure 3. The change in microwave radiation power in relative units passing through the cellular glass sample with pore sizes up to 1 mm at a frequency of 10 GHz from its temperature T with heating.

жидкой воды внутри пеностекла. Для более низкой температуры наблюдается резкое возрастание прошедшей мощности излучения (область температур T_1-T_2), что можно объяснить вымерзанием объемной воды в крупных порах пеностекла. Широкий диапазон температур резкого повышения проходящей мощности связан с тем, что в исследуемом образце поры имеют не строго определенные размеры, и соответственно, температура фазового перехода вода-лед в порах также имеет различное значение (чем больше диаметр пор, тем температура фазового перехода вода-лед выше). Следующий температурный диапазон (область температур T_2-T_3) характеризуется меньшими потерями мощности прошедшего излучения, что определяется вымерзанием остаточной жидкой воды в мелких порах. При более низких температурах (ниже T_3), когда в пеностекле отсутствует жидкая фаза воды, потери излучения от температуры практически не меняются, так как образец представляет собой смесь льда и сухого пеностекла. Таким образом, по виду полученной кривой затухания излучения, прошедшего сквозь увлажненный образец пеностекла, можно оценивать концентрацию воды внутри него.

При условии малости затухания в сухом пеностекле потери в слое незамерзшей воды могут быть определены по данным о поглощении излучения в образце по формуле (для свободного пространства):

$$P = P_M \exp(-\alpha d),$$

где P – мощность сигнала, проходящая через образец; P_M – максимальная мощность сигнала, прошедшего через образец; d – толщина слоя воды в образце, м; α – коэффициент затухания в воде, который зависит от температуры и примесей, растворенных в воде, и определяется по формуле:

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda_0} \kappa,$$

где λ_0 – длина волны, м; κ – мнимая часть коэффициента преломления, которая определяется по формуле:

$$\kappa = \sqrt{0,5(\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon')},$$

где ϵ' , ϵ'' – действительная и мнимая части относительной комплексной диэлектрической проницаемости жидкой воды, которые можно определить по формулам работ [15, 16].

В прямоугольном волноводе измерение коэффициента затухания (в разях на метр) можно определить по формуле [17]:

$$\kappa = \sqrt{0,5(\sqrt{\epsilon'^2 + \epsilon''^2} - \epsilon')},$$

Следовательно, с использованием сверхвысокочастотной влагометрии возможно непрерывное наблюдение за изменением содержания незамерзшей воды и установление ее количества в пористых материалах при отрицательных температурах.

Для примера были выполнены расчеты по содержанию воды в мелкопористом пеностекле, график изменения мощности от температуры в процессе нагревания для которого приведен на рис. 3. Результаты расчетов для участка нагревания приведены на рис. 4, где показана зависимость слоя незамерзшей воды в образце от температуры.

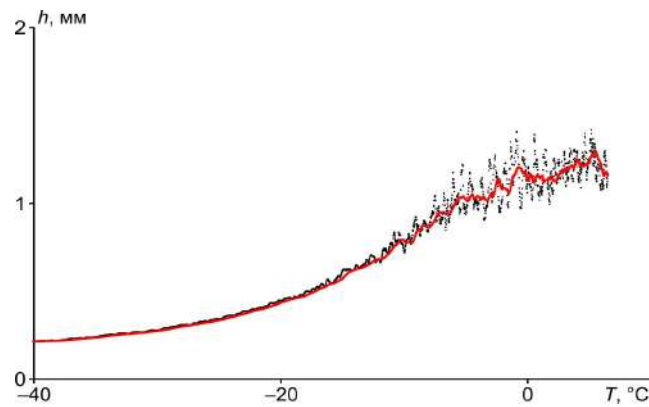


Рисунок 4. Изменение количества незамерзшей воды от температуры, пересчитанного на толщину h , мм, образца пеностекла с размерами пор до 0,1 мм. Толщина образца пеностекла 20 мм.

Figure 4. The change in the amount of unfrozen water from the temperature, recalculated for a thickness h , mm, of the cellular glass sample with pore sizes up to 0.1 mm. The thickness of the cellular glass sample is 20 mm.

В результате из экспериментально полученных данных следует, что с понижением температуры уменьшается общее количество незамерзшей воды. Причем в образцах пеностекла фазовый переход свободной воды вблизи 0 °С нерезкий, т. е. температура фазового перехода вода–лед растягивается на десятки градусов. При температуре, близкой к -30 °С, доля незамерзшей воды от общего количества по оценке составляет около 10 % от ее общего количества в образце.

Эту особенность можно объяснить большим объемом пор нанометровых размеров, в которых вода может быть существенно переохлаждена. Для пор с диаметром 4 нм температура таяния льда в порах приблизительно равна -30 °С [10]. Таким образом, эксперимент показывает наличие значительного объема пор нанометровых размеров.

Несмотря на большое количество пор различных размеров, в пеностекле преобладают все-таки более крупные поры. Однако малое количество захваченной воды в исследуемом образце говорит о том, что большее число крупных пор закрыты и вода внутрь них не проникает. Кроме того, после изготовления пеностекла в нем, по-видимому, возникает сеть наноразмерных пор, которые с течением времени накапливают незамерзшую при низких температурах воду. Эта вода находится в порах с диаметром менее 2 нм в связанном состоянии, и ее влияние на тепловые и механические свойства среды требует специального изучения.

Если сравнить поведение диэлектрических потерь пеностекла с другим строительным материалом – увлажненным песком, то их зависимости от изменения температуры имеют схожий характер в случае мелкодисперсной среды [18].

При измерениях в цикле нагревания-охлаждения было обнаружено, что количество незамерзшей воды при одной и той же температуре отличается в зависимости от направления теплового процесса. Для определения концентрации незамерзшей воды целесообразно использование участка нагревания образца после его глубокого охлаждения.

В результате выполненного эксперимента показана возможность определять количество незамерзшей воды в пеностекле методом СВЧ-влажнометрии, что может быть использовано при проектировании утеплений зданий и сооружений.

Выводы

Показано, что методом СВЧ-влажнометрии можно определять наличие жидкой воды в пеностекле при отрицательных температурах.

Обнаружено, что в пеностекле, кроме пор микронных размеров, имеется широкий набор пор нанометровых размеров ~10...4 нм, что приводит к размытому по температуре фазовому переходу воды в них в интервале от 0 до -30 °С. Остаточная вода в порах наименьших размеров не вымерзает до температур, близких к -80 °С. Поры наименьших размеров связаны между собой и внешней средой, что приводит к появлению в них конденсата из жидкой воды.

Существует неоднозначность в определении количества незамерзшей воды в пеностекле при отрицательных температурах, это зависит от направления теплового процесса (охлаждение или нагревание пеностекла). Эта особенность связана со свойством воды к переохлаждению, поэтому целесообразно выполнять измерения концентрации жидкой воды на участке нагревания образца после его глубокого охлаждения.

Наличие связанной системы пор нанометровых размеров с их выходом на поверхность пеностекла ставит вопрос об их теплофизических свойствах в условиях увлажнения и фазовых переходах воды при отрицательных температурах. Метод СВЧ-влажнометрии позволяет определять незамерзшую воду в такой системе пор при любой температуре (от 100 °С до -100 °С).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кетов А. А., Толмачев А. В. Пеностекло – технологические реалии и рынок // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 17–23.
2. Минько Н. И., Пучка О. В., Евтушенко Е. И., Нарцев В. М., Сергеев С. В. Пеностекло – современный эффективный неорганический теплоизоляционный материал // Фундаментальные исследования. 2013. № 6/4. С. 849–854.
3. Сапачева Л. В., Горегляд С. Ю. Пеностекло для экологичного строительства в России // Строительные материалы. 2015. № 1. С. 30–31.
4. Ключков Я. В., Непомнящих Е. В., Линейцев В. Ю. Применение пеностекла для регулирования теплового режима грунтов в сложных климатических условиях // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 6 (121). С. 9–15.
5. Истомин В. А., Чувилин Е. М., Махонина Н. А., Буханов Б. А. Определение температурной зависимости содержания незамерзшей воды в грунтах по потенциалу влаги // Криосфера Земли. 2009. Т. XIII, № 2. С. 35–43.
6. Старостин Е. Г. Определение количества незамерзшей воды по кинетике кристаллизации // Криосфера Земли. 2008. Т. XII, № 2. С. 60–64.
7. Цытович Н. А. Механика мерзлых грунтов. М.: Вышш. школа, 1973. 445 с.

8. Handle P. H., Loerting T., Scortino F. Supercooled and glassy water: Metastable liquid(s), amorphous solid(s), and a no-man's land // Proc. Nat. Acad. Sc. (USA). 2017. Vol. 114. Issue 51. P. 13336–13344.
9. Angell C. A. Forty Years of Silica Simulations. Which Way Now? // International Journal of Applied Glass Science. 2015. Vol. 6. Issue 1. P. 3–14.
10. Limmer D. T., Chandler D. Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores // Journal of Chemical Physics. 2012. Vol. 137. P. 044509-1–11. DOI: 10.1063/1.4737907
11. Anisimov M. A. Cold and Supercooled Water: A Novel Supercritical-Fluid Solvent // Russian Journal of Physical Chemistry B. 2012. Vol. 6. № 8. P. 861–867.
12. Mishima O., Stanley H. E. The relationship between liquid, supercooled and glassy water // Nature. 1998. Vol. 396. P. 329–335.
13. Бензарь В. К. Техника СВЧ-влажнометрии. Минск: Высш. школа, 1974. 349 с.
14. Álvarez A., Fayos-Fernández J., Monzó-Cabrera J., Cocero M. J., Mato R. B. Measurement and correlation of the dielectric properties of a grape pomace extraction media. Effect of temperature and composition // Journal of Food Engineering. 2017. Vol. 197. P. 98–106.
15. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Хапин Ю. Б. Коэффициент затухания и диэлектрическая проницаемость переохлажденной объемной воды в интервале температур 0...–90 °С на частотах 11...140 ГГц // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 3. С. 255–270.
16. Meissner T., Wentz F. J. The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations // IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens. 2004. Vol. 42, № 9. P. 1836–1849.
17. Харвей А. Ф. Техника сверхвысоких частот. М.: Сов. радио, 1965. Т. 1. 784 с.
18. Бордонский Г. С., Орлов А. О., Филиппова Т. Г. Температурная зависимость электрических параметров мерзлого песка на низких частотах // Радиотехника и электроника. 2006. Т. 51, № 3. С. 314–319.

Статья поступила в редакцию 29 апреля 2018 г.

Measurement of the content of unfrozen water in cellular glass at low temperatures

Sergey Vasil'evich Tsyrenzhapov,
Aleksandr Aleksandrovich Gurulev,
Alekshey Olegovich Orlov
lgc255@mail.ru

Institute of Natural Resources, Ecology and Cryology
of the Siberian Branch of RAS
Chita, Russia

Relevance of the work is due to the active use of cellular glass as a heater in construction and, as a consequence, the requirement to study its physical properties over a wide temperature range.

Methods of research. The determination of the amount of water in the liquid state in cellular glass at negative temperatures was performed with the microwave water content measurements. This method is based on measuring the power of electromagnetic radiation in the microwave range that has passed through the cellular glass sample under study when its temperature changes. The measurements were performed at a frequency of 10 GHz.

Purpose of the work: to study the possibilities of the method for determining the amount of moisture in cellular glass at the temperature range 0 ... –100 °C.

Results. Experimental data are given on the measurement of the amount of unfrozen water in fine-pored cellular glass as a function of temperature. Water in a supercooled state has a number of anomalous properties, which should be taken into account when using humidified media at negative temperatures. When calculating the amount of water in a sample, it is necessary to take into account the real and imaginary parts of the relative complex permittivity of supercooled water at the microwave range. The authors have used the empirical dependence of the electromagnetic parameters of water at negative temperatures when calculating the amount of supercooled water in fine-pored foam glass; it was proposed by the co-author of this paper, O. Orlov. As a result of the experiment it was shown that some of the water in the material under study remains in the liquid state to a temperature of –80 °C.

Conclusion. It is established that the major part of the liquid water in coarse-porous cellular glass transforms into a solid phase – ice at a temperature close to 0 °C; in the fine-pored cellular glass, this transition extends to –30 °C. Moreover, in the cooling-heating cycle of cellular glass, a hysteresis of electromagnetic losses was revealed. The proposed method for determining supercooled water will be useful to civil engineers when calculating buildings and structures using cellular glass as a heat insulation material.

Keywords: cellular glass, supercooled water, microwave band, negative temperature range, microwave water content measurements.

REFERENCES

1. Ketov A. A., Tolmachev A. V. 2015, *Penosteklo – tekhnologicheskiye realii i rynek* [Cellular glass – technological realities and market]. *Stroitel'nyye materialy* [Constructional materials], no. 1, pp. 17–23.
2. Minko N. I., Puchka O. V., Evtushenko E. I., Nartsev V. M., Sergeev S. V. 2013, *Penosteklo – sovremennyy effektivnyy neorganicheskiy teploizolyatsionnyy material* [Cellular glass is a modern effective inorganic thermal insulation material]. *Fundamental'nyye issledovaniya* [Fundamental research], no. 6/4, pp. 849–854.
3. Sapacheva L. V., Goreglyad S. Yu. 2015, *Penosteklo dlya ekologichnogo stroitel'stva v Rossii* [Cellular glass for sustainable construction in Russia]. *Stroitel'nyye materialy* [Constructional materials], no. 1, pp. 30–31.
4. Klochkov Ya. V., Nepomnyashchikh E. V., Lineytsev V. Yu. 2015, *Primeneniye penostekla dlya regulirovaniya teplovogo rezhima gruntov v slozhnykh klimaticheskikh usloviyakh* [Application of cellular glass for regulating the thermal regime of soils under difficult climatic conditions]. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Transbaikal State University], no. 6(121), pp. 9–15.
5. Istomin V. A., Chuvinin E. M., Mahonina N. A., Bukhanov B. A. 2009, *Opredeleeniye temperaturnoy zavisimosti soderzhaniya nezamerzshey vody v gruntakh po potentsialu vlagi* [Determination of the temperature dependence of the content of unfrozen water in soils by the moisture potential]. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], vol. XIII, no. 2, pp. 35–43.
6. Starostin E. G. 2008, *Opredeleeniye kolichestva nezamerzshey vody po kinetike kristallizatsii* [Determination of the amount of unfrozen water in the kinetics of crystallization]. *Kriosfera Zemli* [Earth's Cryosphere], vol. XII, no. 2, pp. 60–64.
7. Tsytovich N. A. 1973, *Mekhanika merzlykh gruntov* [Mechanics of frozen soils]. Moscow, 445 p.
8. Handle P. H., Loerting T., Scortino F. 2017, Supercooled and glassy water: Metastable liquid(s), amorphous solid(s), and a no-man's land. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, issue 51, pp. 13336–13344.
9. Angell C. A. 2015, Forty Years of Silica Simulations. Which Way Now? *International Journal of Applied Glass Science*, vol. 6, issue 1, pp. 3–14.
10. Limmer D. T., Chandler D. 2012, Phase diagram of supercooled water confined to hydrophilic nanopores. *Journal of Chemical Physics*, vol. 137, pp. 044509-1–11. DOI 10.1063/1.4737907.
11. Anisimov M. A. 2012, Cold and Supercooled Water: A Novel Supercritical-Fluid Solvent. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, vol. 6, no. 8, pp. 861–867.
12. Mishima O., Stanley H. E. 1998, The relationship between liquid, supercooled and glassy water. *Nature*, vol. 396, pp. 329–335.
13. Benzar V. K. 1974, *Tekhnika SVCh-vlagometrii* [Microwave moisture meter technique]. Minsk, 349 p.
14. Álvarez A., Fayos-Fernández J., Monzó-Cabrera J., Cocero M. J., Mato R. B. 2017, Measurement and correlation of the dielectric properties of a grape pomace extraction media. Effect of temperature and composition. *Journal of Food Engineering*, vol. 197, pp. 98–106.
15. Bordonsky G. S., Orlov A. O., Khapin Yu. B. 2017, *Koeffitsiyent zatukhaniya i dielektricheskaya pronitsayemost' pereokhlazhdennoy ob'yemnoy vody v intervale temperatur 0...–90 °S na chastotakh 11...140 GGts* [The attenuation coefficient and the dielectric constant of supercooled bulk water in the temperature range 0 ... – 90 °C at frequencies of 11 ... 140 GHz]. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa* [Current problems in remote sensing of the Earth from space], vol. 14, no. 3, pp. 255–270.
16. Meissner T., Wentz F.J. 2004, The complex dielectric constant of pure and sea water from microwave satellite observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 9, pp. 1836–1849.
17. Harvey A. F. 1965, *Tekhnika sverkhvysokikh chastot* [Super-high frequencies technique]. Moscow, vol. 1. 784 p.
18. Bordonsky G. S., Orlov A. O., Filippova T. G. 2006, *Temperaturnaya zavisimost' elektricheskikh parametrov merzlogo peska na nizkikh chastotakh* [Temperature dependence of the electric parameters of frozen sand at low frequencies]. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], vol. 51, no. 3, pp. 314–319.

The article was received on April 29, 2018