

УДК 691.31:534.8.081.7

*ВОТИНОВ АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ, аспирант,
chillerus@gmail.com*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

*СЕМУХИН БОРИС СЕМЕНОВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
semoukhin@yahoo.com*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2,*

Институт физики прочности и материаловедения

Сибирского отделения Российской академии наук,

634021, г. Томск, пр. Академический, 2/4,

*КОВАЛЕВ ГЕННАДИЙ ИВАНОВИЧ, доцент,
vvidkus224@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ АКУСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Современное строительное материаловедение часто встречается с задачами, связанными с измерениями, которые нельзя считать прямыми потому, что они используют градуировочные, экстраполяционные и подгоночные зависимости. Для оценки технологических свойств этого бывает достаточно, и поэтому поиск простых методов определения коэффициента теплопроводности с использованием тарировочных зависимостей является весьма актуальной задачей. В статье предложен способ определения такого коэффициента с помощью измерения акустических характеристик неразрушающим методом. Метод разработан с учетом особенностей состава и структуры пеностеклокристаллического материала.

Кроме того, экспериментальное подтверждение известного факта связи акустических свойств и теплопроводности не является очевидным, т. к. исследования проведены на новом пеностеклокристаллическом материале, модифицированном наноструктурными частицами диоксида циркония. Наличие такого компонента может существенно изменить колебательный спектр и рассеяние фононов, отвечающих за теплоперенос.

Ключевые слова: коэффициент теплопроводности; коэффициент пропускания звука; пеностеклокристаллический материал; способ определения.

*ALEKSANDR V. VOTINOV, Research Assistant,
chillerus@gmail.com*

*BORIS S. SEMUKHIN, DSc, Professor,
semoukhin@yahoo.com*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

*Institute of Strength Physics and Materials Science,
8/2, Akademicheskii Ave., 634021, Tomsk, Russia,*

GENNADII I. KOVALEV, A/Professor,
kvidkus224@yandex.ru
Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia

ACOUSTIC METHOD OF MEASURING THERMAL CONDUCTIVITY OF CONSTRUCTION MATERIALS

Materials science in construction often faces the problem connected with measurements based on calibrating, extrapolational and adjustable dependences. The technological properties can be estimated by these dependences, however, the determination of thermal conductivity requires new measuring methods. This method is based on the properties of the composition and structure of the foam glass-ceramic material. The paper presents a simple non-destructive acoustic method for measuring thermal conductivity. A new foam glass-ceramic material modified by nanostructured zirconium dioxide particles is investigated in this paper. It is shown that zirconium dioxide significantly modifies the vibration spectrum and photon scattering responsible for heat transfer.

Keywords: thermal conductivity, transmittance factor, foam glass-ceramic material.

Определение основных характеристик строительных материалов является неотъемлемой частью аттестации материалов с целью подтверждения их соответствия, что декларируется в № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Проблема подтверждения соответствия может быть решена только с помощью независимой экспертизы, при выполнении которой будет проведена оценка материала и измерены его основные характеристики. Как правило, для такой аттестации необходимо дорогое сертифицированное оборудование, а также аттестованный специалист какого-либо центра или лаборатории по сертификации. При разработке новых материалов на лабораторной стадии или при отладке технологии изготовления можно пренебречь высокой точностью с целью ускорения процесса. Поэтому использование имеющихся простых приборов акустического контроля в качестве экспресс-анализа позволит решить такую задачу. Ее актуальность несомненна для малых предприятий и производств, а также разработчиков новых строительных материалов. В нашей практике мы столкнулись с этой проблемой при разработке и создании новых пеностеклокристаллических материалов с добавками оксидов, в частности при разработке пеностеклокристаллического материала с добавками наноразмерного диоксида циркония.

Несмотря на большое разнообразие применяемых для таких оценок методов и средств измерений, общим в них является физическое воздействие измерительной системы на материал или конструкцию. Измерения возникающего в них эффекта однозначны и достаточно тесно связаны с определяемым показателем. Эта связь может задаваться в аналитическом или графическом виде, но в любом случае она должна иметь область применимости, диапазон действия и погрешность, приемлемые для достоверной оценки определяемого показателя с требуемой точностью. Тогда связь может считаться градуировочной зависимостью (ГЗ) и использоваться для определения нормируемых показателей материалов и конструкций. Таким образом, достоверность таких измерений определяется, с одной стороны, воспроизводимостью физического воздействия

и измерения возникающего эффекта, с другой – метрологическими характеристиками и правильностью использования ГЗ.

Свойства пеностекла определяются его макро- и микроструктурой, изменять которую можно путем введения модифицирующих добавок. Представляет интерес введение в аморфную матрицу частиц кристаллической фазы, заведомо находящихся в наноразмерном состоянии. Актуальность исследования влияния наноразмерных кристаллических добавок на свойства материала обусловлена новыми возможностями пеностекла, сочетающего, например, тепло- и звукоизоляционные характеристики со способностью поглощать электромагнитное излучение.

В твердых телах передача тепла может быть описана в рамках различных представлений. Наиболее распространенным и традиционным является описание с помощью модели кристаллического твердого тела, в решетке которого передача энергии производится за счет колебательных движений атомов – виртуальных частиц, названных фононами. Большая часть работ по изучению явлений теплопереноса базируется именно на таких представлениях. Например, установлено, что длинноволновые фононные моды (1 мкм) обеспечивают высокую теплопроводность аморфного кремния [1]. Для современных популярных нанокристаллических материалов также используется модель фононов. В работе [2] показано, что спектр фононов нанокристаллического кремния больше похож на спектр кристаллического материала; это отражается на механизме теплового переноса. Для описания низкотемпературной теплоемкости в металлических стеклах [3] также предлагается механизм, связанный, прежде всего, с расширением низкочастотных фононных мод.

Более того, основная часть научных экспериментальных работ проделана именно на кристаллических материалах. Однако развитие техники привело к масштабному изменению номенклатуры материалов, их свойств и структуры. Все большее распространение получают некристаллические полифункциональные неметаллические материалы с широким спектром свойств. И самое главное, в них происходят процессы, отличные от традиционных, с очень значимыми и высокоэнергетическими характеристиками. В качестве такового можно рассмотреть и пеностеклянный материал, обладающий очень хорошей теплопроводностью.

Акустические свойства пеностекла позволяют использовать его в качестве звукопоглощающих экранов или облицовочных панелей. Управлять свойствами пеностекла можно, сочетая гранулы с разной дисперсностью [4].

Акустические свойства в особых пеностеклокристаллических материалах могут сочетаться с особыми свойствами [5]. Интересное применение пеностекла предложено в работе [6]. Авторы предлагают использовать бариево-боратные пеностеклянные материалы для защиты от излучений. Проведена оценка минимальной толщины необходимых материалов. В работе [7] также предложен тип пеностекла, пригодный для защиты от электромагнитного излучения.

Известно, что такие величины, как поглощение звука и теплопроводность, прямо пропорциональны одной и той же величине – квадрату частоты волны. В силу этого высокие частоты поглощаются гораздо сильнее, чем низкочастотные. Эта физическая связь и может быть использована для определения той или иной характеристики.

Поэтому целью настоящей работы было установление функциональной связи коэффициента теплопроводности пеностеклового материала, модифицированного диоксидом циркония, с коэффициентом прохождения звуковых волн и подтверждения вышеуказанной физической связи колебательной системы атомов с акустическими и тепловыми свойствами для наноструктурированных материалов, что позволяет считать это научной новизной работы.

Для определения коэффициента теплопроводности используют различные методы. Например, в статье [8] описан метод определения коэффициента теплопроводности строительного материала – силикатного кирпича. В основе метода лежит бесконтактное действие на поверхность кирпича инфракрасного излучения и нахождение температурного поля в период нагревания с помощью термопреобразователей. Затем путем решения уравнения теплопроводности находится сам коэффициент теплопроводности. Другой метод на основе СВЧ-излучения предложен в статье [9].

Для аттестации новых разработанных дисперсно-армированных пенобетонов, торфодревесных, стеклокристаллических материалов в работах А.И. Кудякова, Н.О. Копаницы и других использовано традиционное определение теплопроводности материалов методом стационарного теплового потока в соответствии с ГОСТ 7076–99 [10–14].

Нами для определения коэффициента теплопроводности предложен акустический метод [15].

Для решения поставленной задачи использовали образцы пеностеклокристаллического материала с разным содержанием диоксида циркония.

Измерения коэффициента пропускания звуковых волн материалом проводили на стенде, разработанном авторами, по методике, описанной в ГОСТ 31296.2–2006 (ИСО 1996-2:2007) Частотный анализ шума, эквивалентный уровню звукового давления, проводили с помощью прибора – шумомера ОКТАВА-101 АМ с учетом октавных фильтров в полосах со среднегеометрическими частотами: 250; 500; 1000; 2000; 4000 и 8000 Гц. Источником звука служили широкополосные акустические колонки типа GENIUS SP-E200 с частотным диапазоном 10–20 000 Гц. В качестве лабораторного генератора сигнала применяли звуковую карту компьютера. Для моделирования сигналов использовали компьютерную программу «Генератор звуковых частот» с разными формами выходного сигнала: «генератор синусоиды», «генератор белого шума», «генератор прямоугольных импульсов», «генератор треугольных импульсов», «генератор пилообразного напряжения» или «генератор пилы». Частота полезного выходного сигнала может быть плавно изменена от 1 до 20 000 Гц с дискретностью 1 и 10 Гц. Цифровой генератор звуковой частоты даёт возможность плавной регулировки уровня амплитуды сигнала от 0 до 100 мВ.

Для итогового расчёта коэффициента пропускания было использовано выражение

$$K = ((10D_0/10))/((10D_{06}/10)), \quad (1)$$

где K – коэффициент пропускания материала; D_0 – измерение шумомером без образца; D_{06} – измерение шумомером с образцом.

На рис. 1 приведена зависимость коэффициента пропускания для материала с разной концентрацией добавки диоксида циркония. Видно, что наиболее удобным и достоверным можно считать измерения коэффициента пропускания для 4000 и 8000 Гц.

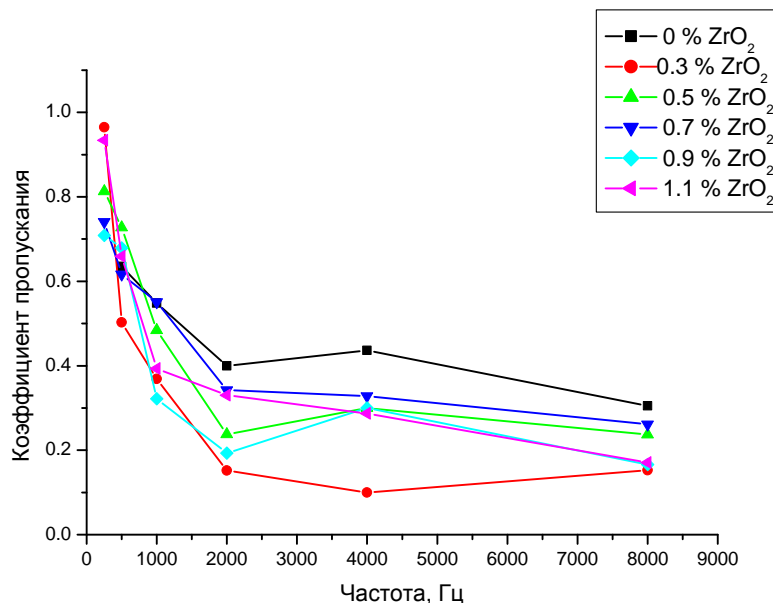


Рис. 1. Зависимость коэффициента пропускания звука от частоты [15]

Для исследования теплопроводных свойств образцов с содержанием диоксида циркония была использована установка ИТП-МГ4 «СКБ Стройприбор». Измерения проводили в соответствии с ГОСТ 7076–99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». В настоящем методе предусматривается предварительное построение градуировочной зависимости (ГЗ) между коэффициентом теплопроводности исследуемого материала и коэффициентом пропускания звука.

Поэтому коэффициент теплопроводности был измерен для всех частотных диапазонов материалов, но наиболее достоверный график зависимости K_T от коэффициента пропускания K_a был получен для 8000 Гц (рис. 2). Коэффициент корреляции $R = 0,8$ позволяет использовать эту связь для экспресс-анализа (определения теплофизических свойств – K_T , коэффициента теплопроводности – K_a) любого строительного пеностеклокристаллического материала по следующей формуле, в которой для разных материалов будут иные константы:

$$K_T = A + BK_a, \quad (2)$$

где $A = 0,039$; $B = 0,05$.

Таким образом, установлена функциональная связь между параметром, определяющим теплофизические свойства строительного материала (пеностеклокристаллического материала), и параметром, описывающим его акустические свойства. Для определения коэффициента теплопроводности по

этой функциональной зависимости необходимо предварительно построить градуировочную зависимость, затем, используя любой прибор типа шумомера, определить для больших частот коэффициент пропускания и, используя аналитическую зависимость, вычислить значение коэффициента.

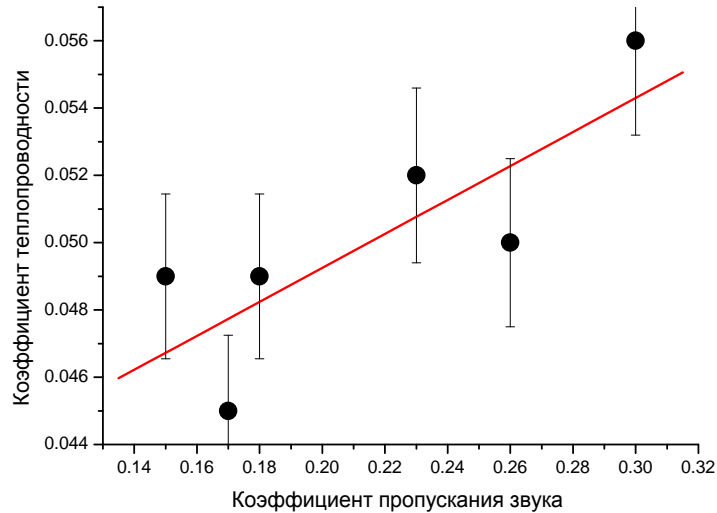


Рис. 2. Линейная зависимость коэффициента теплопроводности от коэффициента пропускания для пеностеклокристаллического материала на частоте 8000 Гц

По результатам исследований можно сделать вывод о значительном влиянии модифицирующих нанодобавок на коэффициент пропускания звука. Это выражается в его существенном уменьшении при высоких частотах на 30 % по сравнению с исходным. Влияние нанодобавок более ощутимо сказывается на теплоизоляционных свойствах – коэффициент теплопроводности уменьшается на 50 % по сравнению с исходным. Однако прямолинейная связь между тепловыми и акустическими свойствами остается неизменной, что подтверждает единство природы этих свойств и позволяет использовать установленную аналитическую зависимость для вычисления коэффициента теплопроводности строительных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Donadio, Y.H. Heat transport in amorphous silicon: Interplay between morphology and disorder / Y.H. Donadio, D. Galli, Giulia // Applied Physics Letters. – 4/4/2011. – V. 98. – Is. 14. – p144101. – 3 p.
2. Crossover in thermal transport mechanism in nanocrystalline silicon Bodapati, Arun and Keblinski, Pawel and Schelling, Patrick K. and Phillpot, Simon R. // Applied Physics Letters. – 88. – 141908 (2006). – DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2192145>
3. Low Temperature Heat Capacity of a Severely Deformed Metallic Glass / Bünz, Jonas de-Brink, Tobias Koichi Tsuchiya Fanqiang Meng Wilde, Gerhard Albe, Karsten // Physical Review Letters. – 4/4/2014. – V. 112. – Is. 13. – p135501-1-135501-5.
4. Самойленко, И.И. Влияние дисперсности стекольной шихты на структуру и свойства пеностекла / И.И. Самойленко, Т.К. Углова, О.С. Татаринцева // Стекло и керамика. – 2014. – № 6. – С. 3–6.

5. Казанцева, Л.К. Особые свойства пеностекла из природного сырья / Л.К. Казанцева, Г.И. Стороженко // Строительные материалы. – 2013. – № 9. – С. 34–39.
6. Маскирующие свойства пеностекла от ультрафиолетового и рентгеновского излучений / А.В. Короленко, В.А. Маслов, С.Н. Тригуб, О.Н. Товстокорый // Вестник Хмельницкого национального университета. Технические науки. – 2014. – № 2 (211). – С. 73–76.
7. Benzerga, R. Waste-glass recycling: A step toward microwave applications / R. Benzerga, V. Laur, R. Lebullenger // Materials research bulletin. – 2015. – V. 67. – P. 261–265.
8. Экспериментально-расчетное определение коэффициента температуропроводности твердого тела на примере силикатного кирпича при нестационарном тепловом режиме / Д.Ф. Карпов, М.В. Павлов, А.А. Синицын, Ю.А. Калягин, Ю.С. Гаврилов, Д.А. Погодин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 2 (39). – С. 213–221.
9. Чернышов, А.В. СВЧ-метод и система оперативного контроля теплофизических характеристик строительных материалов / А.В. Чернышов, Д.О. Голиков, В.Н. Чернышов // Вестник высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 1. – С. 17–23.
10. Копаница, Н.О. Влияние влажностного режима эксплуатации зданий на теплоизоляционные свойства торфодревесных материалов / Н.О. Копаница, М.А. Ковалева // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 4 (33). С. 161–166.
11. Конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны с термомодифицированной торфяной добавкой / А.И. Кудяков, Н.О. Копаница, И.А. Прищепа, С.Н. Шаньгин // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2013. – № 1 (38). – С. 172–178.
12. Кудяков, А.И. Пенобетон дисперсно-армированный теплоизоляционный естественного твердения / А.И. Кудяков, А.Б. Стешенко // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 2 (43). – С. 127–134.
13. Кудяков, А.И. Технология гранулированного стеклокристаллического материала для теплоизоляции ограждающих конструкций чердачного перекрытия / А.И. Кудяков, А.С. Апкарьян // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 1 (48). – С. 132–140.
14. Определение акустических свойств пеностеклокристаллических материалов / Б.С. Семухин, О.В. Казьмина, Г.И. Ковалев, Ю.В. Опаренков, М.А. Душкина // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 7/2. – С. 334–338.
15. Влияние малых добавок диоксида циркония на акустические свойства пеностеклольных материалов / Б.С. Семухин, А.В. Вотинов, О.В. Казьмина, Г.И. Ковалев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2014. – № 6 (47). – С. 123–132.

REFERENCES

1. Yuping He, Davide Donadio, Giulia Galli. Heat transport in amorphous silicon: Interplay between morphology and disorder. *Applied Physics Letters*. 2011. V. 98. No. 14. P. 144101.
2. Bodapati A., Koblinski P., Schelling P.K., Phillpot S.R. Crossover in thermal transport mechanism in nanocrystalline silicon. *Applied Physics Letters*. 2006. V. 88. P. 141908.
3. Jonas Bünz, Tobias Brink, Koichi Tsuchiya, Fanqiang Meng, Gerhard Wilde, Karsten Albe. Low temperature heat capacity of a severely deformed metallic glass. Bünz, *Physical Review Letters*. 2014. V. 112. No. 13. P. 135501.
4. Samoilenko I.I., Uglova T.K., Tatarintseva O.S. Vliyanie dispersnosti stekol'noi shikhty na strukturu i svoystva penostekla [Effect of glass mixture dispersiveness on glass foam]. *Glass and Ceramics*. 2014. No. 6. Pp. 3–6. (rus)
5. Kazantseva L.K., Storozhenko G.I. Osobyie svoystva penostekla iz prirodnoy syr'ya [Properties of glass foam based on natural raw materials]. *Construction Materials*. 2013. No. 9. Pp.34–39. (rus)
6. Korolenko A.V., Maslov V.A., Trigub S.N., Tovstokoryi O.N. Maskiruyushchie svoystva penostekla ot ul'trafiioletovogo i rentgenovsogo izlucheniya [Masking glass foam for ultraviolet and X-ray radiations]. *Herald of Khmelnytskyi National University. Tekhnicheskie nauki*. 2014. No. 2 (211). Pp. 73–76. (rus)

7. Ratiba Benzerga, Vincent Laur, R. Lebullenger, Laurent Le Gendre, Sébastien Genty, et al. *Materials Research Bulletin*. 2015. V. 67. Pp. 261–265.
8. Karpov D.F., Pavlov M.V., Sinitsyn A.A., Kalyagin Yu.A., Gavrilov Yu.S., Pogodin D.A. Eksperiment'no-raschetnoe opredelenie koeffitsienta temperaturoprovodnosti tverdogo tela na primere silikatnogo kirpicha pri nestatsionarnom teplovom rezhime [Thermal conductivity of silicate brick under non-stationary conditions]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 2. Pp. 213–221. (rus)
9. Chernyshov A.V., Golikov D.O., Chernyshov V.N. SVCh-metod i sistema operativnogo kontrolya teplofizicheskikh kharakteristik stroitel'nykh materialov [SHF method and operating control system for thermal and physical properties of construction materials]. *Vestnik vysshikh uchebnykh zavedenii Chernozem'ya* [News of Higher Educational Institutions of the Chernozem Region]. 2010. No. 1. Pp. 17–23. (rus)
10. Kopanitsa N.O., Kovaleva M.A. Vliyanie vlazhnostnogo rezhima ekspluatatsii zdaniy na teploizolyatsionnye svoystva torfodrevesnykh materialov [Moisture conditions of building servicing influencing heat-insulating properties of peat and wood materials]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2011. No. 4. Pp. 161–166. (rus)
11. Kudyakov A.I., Kopanitsa N.O., Prishchepa I.A., Shan'gin S.N. Konstruktsionno-teploizolyatsionnye penobetony s termomodifitsirovannoi torfyanoi dobavkoi [Structural and heat-insulating foam concrete with thermally-modified additive]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2013. No. 1. Pp. 172–178. (rus)
12. Kudyakov A.I., Steshenko A.B. Penobeton dispersno-armirovannyi teploizolyatsionnyi estestvennogo tverdeniya [Fiber-reinforced foam concrete of natural hardening]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 2. Pp. 127–134. (rus)
13. Kudyakov A.I., Apkar'yan A.S. Tekhnologiya granulirovannogo steklokristallicheskogo materiala dlya teploizolyatsii ograzhdayushchikh konstruktsii cherdachnogo perekrytiya [Glass-ceramic granulated technology for exterior wall heat insulation]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2015. No. 1. Pp. 132–140. (rus)
14. Semukhin, B.S., Kaz'mina O.V., Kovalev G.I., Oparenkov Yu.V., Dushkina M.A. Opredelenie akusticheskikh svoystv penosteklokristallicheskikh materialov [Acoustic properties of foam glass-ceramic materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Fizika* [Russian Physics Journal]. 2013. V. 56. No. 7/2. Pp. 334–338. (rus)
15. Semukhin B.S., Votinov A.V., Kaz'mina O.V., Kovalev G.I. Vliyanie malykh dobavok dioksida tsirkoniya na akusticheskie svoystva penostekol'nykh materialov [The effect of small additives of zirconium dioxide on acoustic properties of foam glass]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building*. 2014. No. 6. Pp. 123–132. (rus)