УДК 620.179.15 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-2-146-152

Компьютерная томография пенобетона

С.П. Осипов[1a], И.А. Прищепа[2b], А.И. Кудяков[2c], А.В. Батранин[1d], О.С. Осипов[3e]

[1]Томский политехнический университет, пр. Ленина 30, Томск, Россия
[2]Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная 2, Томск, Россия
[3]Компания Сольвейг Мультимедиа, пр. Развития 3, Томск, Россия
[a]osip1809@rambler.ru, [b]ingaprishepa@mail.ru, [c]kudyakow@tsuab.ru, [d]batranin@tpu.ru, [e]ososipov@rambler.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-2297-184X, [b]https://orcid.org/0000-0002-0394-7481, [c]https://orcid.org/0000-0002-8927-6833,
[d]http://orcid.org/0000-0001-9678-2905, [e]https://orcid.org/0000-0002-1910-2977
Статья поступила 9.04.2018, принята 22.04.2018

В статье приведены результаты исследования структуры конструкционно-теплоизоляционного пенобетона с использованием компьютерной томографии при разработке инновационных процессов повышения качества цементных пенобетонов путем введения на стадии приготовления смесей органоминеральных пористых дисперсных добавок. Приведена геометрическая схема формирования первичной радиометрической информации (проекций), в соответствии с которой кубический стандартный пенобетонный образец на вращающемся столе облучается коническим пучком рентгеновского излучения. Излучение регистрируется плоской матрицей радиометрических детекторов. Для проведения исследований пенобетонов использовался комплекс компьютерной томографии «Орел МТ», а в качестве органоминеральных дисперсных пористых добавок — термомодифицированный торф и зола унос от сжигания каменных углей. Средняя плотность пенобетонов составляет 633–657 кг/м^3. Показана возможность оценки размеров и пространственного распределения пор пенобетона в образцах, используя компьютерную томографию на основе калибровки исходных проекций по методу непрерывного клина. На реконструированных сечениях испытуемых образцов отчетливо интерпретируются отдельные крупные поры и поры средних размеров, мелкопористые фрагменты, трещины и цепочки пор, которые могут превратиться в трещины. Установлено, что в пенобетоне с термомодифицированной торфяной добавкой поры имеют преимущественно размеры 0,5 мм, т. е. в два раза меньше, чем в контрольных образцах и с добавкой золы уноса. Разработан алгоритм оценки степени однородности распределения пор в конструкционно-теплоизоляционном пенобетоне по локальным объемам, проведена апробация разработанного алгоритма на образцах конструкционно-теплоизоляционного пенобетона. Приведены результаты исследования структуры образцов пенобетона с органоминеральными добавками методом компьютерной томографии с оценкой параметров структурных фрагментов. По результатам компьютерной томографии установлено, что введение термомодифицированной торфяной добавки в пенобетонную смесь способствует уменьшению размера пор и повышению однородности их распределения, уменьшению теплопроводности и повышению прочности бетона на сжатие. Результаты исследований рекомендуется использовать при разработке или совершенствовании технологии пенобетона улучшенного качества.

Ключевые слова: конструкционно-теплоизоляционный пенобетон; компьютерная томография; исследование размера и распределения объема пор; однородность параметров пористости.

Computer tomography of foam concrete

S.P. Osipov[1a], I.A. Prishchepa[2b], A.I. Kudyakov[2c], A.V. Batranin[2d], O.S. Osipov[3e]

[1]Tomsk Polytechnic University; 30, Lenin Ave., Tomsk, Russia
[2]Tomsk State University of Architecture and Building; 2, Solyanaya Sq., Tomsk, Russia
[3]Solveig Multimedia Company; 3, Razvitiya Per., Tomsk, Russia
[a]osip1809@rambler.ru, [b]ingaprishepa@mail.ru, [c]kudyakow@tsuab.ru, [d]batranin@tpu.ru, [e]ososipov@rambler.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-2297-184X, [b]https://orcid.org/0000-0002-0394-7481, [c]https://orcid.org/0000-0002-8927-6833,
[d]http://orcid.org/0000-0001-9678-2905, [e]https://orcid.org/0000-0002-1910-2977
Received 9.04.2018, accepted 22.04.2018

The research results of the structural and heat-insulation foam concrete organization are represented in the article. Studies were conducted using computer tomography when developing innovative processes for improving the quality of cement foam concrete by introducing mixtures of organomineral porous dispersed additives at the stage of preparation. A geometric diagram of the formation of primary radiometric information (projections) is given, in accordance with which a cubic standard foam-concrete sample on a rotating table is irradiated with a conical X-ray beam. The radiation is detected by a plane matrix of radiometric detectors. To conduct studies of foam concrete, the complex of computer tomography "Orel MT" was used, and thermo-modified peat and ashes from the combustion of coal were used as organomineral dispersed porous additives. The average density of foam concrete is 633-657 kg / m3. The possibility of estimating the size and spatial distribution of the pores of foam concrete in the samples is shown using computer tomography based on the calibration of initial projections using the continuous wedge method. The reconstructed sections of the test samples clearly interpret individual large and medium size pores; fine-pored fragments; cracks and chains of pores that can turn into cracks. It is established that in the foam concrete with a thermo-modified peat additive, the pores preferably have a size of 0.5 mm, i.e. 2 times less than in the control samples and with the addition of fly ash. An algorithm for estimating the degree of homogeneity of the distribution of pores in the structural and heat-insulating foam concrete according to local volumes has been developed and the approbation of the *developed algorithm on samples has been carried out. The results of a study of the foam concrete samples structure with organomineral additives by the method of computed tomography with parameters estimation of structural fragments are given. According to the results of computed tomography, it is demonstrated that the introduction of a thermo-modified peat additive into a foam concrete mix helps to reduce the pore size and increase the homogeneity of their distribution, reduce thermal conductivity and increase the strength of concrete for compression. The results of research are recommended to be used in the technologies development and improvement of improved quality foam concrete.*

Keywords: structural and heat-insulating foam concrete; computed tomography; study of the size, distribution, pore volume; homogeneity of porosity parameters.

Введение

При разработке новых строительных материалов и контроле их качества при изготовлении, подтверждении соответствия требованиям нормативных документов в строительстве (сертификации), а также оценке их технического состояния в конструкциях зданий используются неразрушающие методы испытаний, которые позволяют определить прочность, морозостойкость, теплопроводность, усадочные деформации, трещины и другие свойства [1−5]. Практически все строительные материалы — это капиллярно-пористые вещества, эксплуатационные характеристики которых зависят от содержания и вида пор. При оценке качества строительных материалов неразрушающими методами чаще всего используются установленные закономерности между определяемым параметром и пористостью. В одних случаях при формовании изделий технологическими приемами уменьшают пористость (конструкционные и морозостойкие бетоны), в других наоборот вводят пенообразующие добавки (пенобетоны). Для решения проблем теплозащиты при устройстве ограждающих конструкций зданий эффективно использовать поризованные бетоны (пено- и газобетоны).

Пенобетон обладает рядом свойств, существенно отличающих его от тяжелого бетона. Высокие теплоизоляционные свойства, уменьшенный расход цемента и энергоемкость, невысокая плотность и простота механической обработки позволяют рекомендовать его для использования в качестве стеновых материалов при устройстве ограждающих конструкций энерго- и ресурсосберегающих объектов строительства [6−9]. Управляя пористостью, можно регулировать эксплуатационные характеристики стеновых материалов в широких пределах [6, 7, 10, 11]. На теплозащитные характеристики и долговечность пенобетонов существенно влияют количество (объем), размер, форма пор, а также однородность указанных показателей, влияющих на привлекательность этого материала в строительстве.

Цель работы — изучить особенности формирования структуры пенобетона, модифицированного пористыми дисперсными добавками, с использованием компьютерной томографии.

Традиционным способом исследования структуры пенобетонов является метод последовательного срезания слоев в образце с последующим анализом подготовленной поверхности визуально-измерительным методом или с помощью обработки цифровых фотографических изображений специализированными программами [12−14]. Основными недостатками данного способа являются искажение структуры среза испытуемых образцов и пыление при механическом воздействии на материал, а также низкая производительность. В качестве альтернативного метода исследования и оценки структуры образцов строительных материалов предлагается применение компьютерной томографии [15−20]. В литературе практически не рассмотрены особенности интерпретации результатов томографических исследований структуры пенобетонов.

На рис. 1 приведена геометрическая схема формирования первичной радиометрической информации (проекций). Объект из пенобетона, находящийся на вращающемся столе, облучается коническим пучком рентгеновского излучения. Излучение регистрируется плоской матрицей радиометрических детекторов [21].

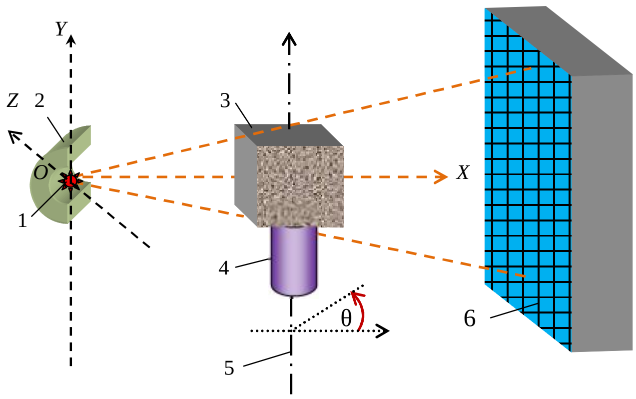


Рис. 1. Схема формирования проекций в трехмерной компьютерной томографии [20]: 1 — источник излучения; 2 — радиационная защита; 3 — объект контроля; 4 — предметный стол; 5 — ось вращения предметного стола; 6 — матрица детекторов

Для уменьшения эффекта немоноэнергетичности при исследованиях структуры пенобетона использовался метод калибровки по ступенчатому или непрерывному клину [22-24]. Следует отметить, что этот метод эффективен для исследования материалов, структурные фрагменты которых незначительно отличаются по эффективному атомному номеру. Конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны изготавливаются из мелкозернистого песка, цементного теста и небольшого количества пенообразователя, поэтому материалы твердой матрицы пенобетона практически не отличаются по эффективному атомному номеру.

Для проведения исследований структуры образцов пенобетона использовался комплекс компьютерной томографии «Орел-МТ» (рис. 2), разработанный Томским политехническим университетом совместно с лабораторией технических средств неразрушающего контроля (Москва) [25-26]. Основные технические характеристики томографа «Орел-МТ» приведены в [27].

При проведении экспериментальных исследований структуры пенобетонов методом компьютерной томографии использовались образцы из неавтоклавных пенобетонов, изготовленные по технологии, разработанной на кафедре «Строительные материалы и технологии» Томского государственного архитектурно-строительного университета. Образцы пенобетона имеют форму куба с длиной ребра 100 мм. Образец № 1, контрольный, изготовлен в соответствии с рекомендациями [28]. В исходной смеси образца № 2 часть цемента заменена золой унос тепловой электростанции, работающей на каменном угле. При изготовлении образца № 3 в смесь вводилась термомодифицирующая торфяная добавка ТМТ 600 [29-30].

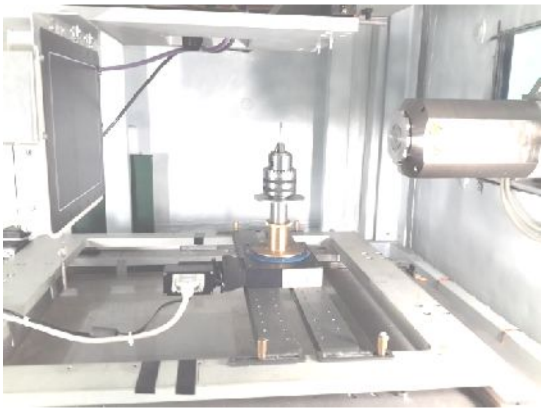


Рис. 2. Комплекс компьютерной томографии «Орел-МТ» [22]

Значения средней плотности образцов находятся в интервале 633–657 кг/м^3. Физико-механические свойства пенобетона, установленные стандартными методами, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Физико-механические свойства пенобетона

Свойства пенобетона	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Средняя плотность, *кг/м^3*	657	630	633
Пористость, *%*:			
общая	37,2	50,1	50,2
открытая	33,2	24,2	22,5
закрытая	4,2	25,9	27,7
Водопоглощение, *%*:			
по объему	33,2	24,2	22,5
по массе	50,8	34,5	39,2
Теплопроводность, *Вт/м·К*	0,12	0,095	0,09
Предел прочности при сжатии, *МПа*	2,02	2,10	2,87

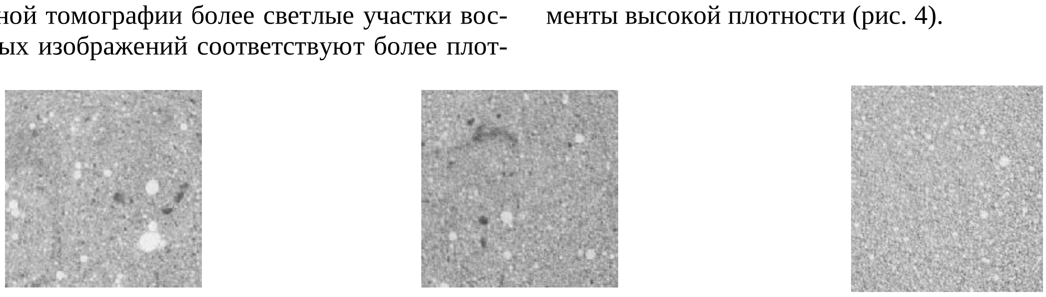
На рис. 3 приведены оптические изображения испытуемых образцов.

a *b* *c*

Рис. 3. Оптические изображения испытуемых образцов неавтоклавного пенобетона: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2; *c* — образец № 3

По результатам анализа предварительных расчетов ослабления рентгеновского излучения предполагаемыми объектами контроля и данных, приведенных в таблице, показана достаточность описанного выше комплекса для выполнения задач исследования структуры пенобетона.

По результатам визуализации внутренней структуры образцов размер d_w элемента пространственного изображения (вокселя) близок к 75 мкм. Традиционно в компьютерной томографии более светлые участки восстановленных изображений соответствуют более плотным, а более темные — менее плотным элементам структуры. Однако для анализа степени однородности строительного материала по пористости более логичен подход к раскраске, в котором поре соответствует белый цвет [29]. На реконструированных сечениях испытуемых образцов отчетливо интерпретируются отдельные крупные поры и поры средних размеров, мелкопористые фрагменты, трещины и цепочки пор, которые могут превратиться в трещины, а также крупные фрагменты высокой плотности (рис. 4).



a *b* *c*

Рис. 4. Реконструированные изображения сечений: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2; *c* — образец № 3

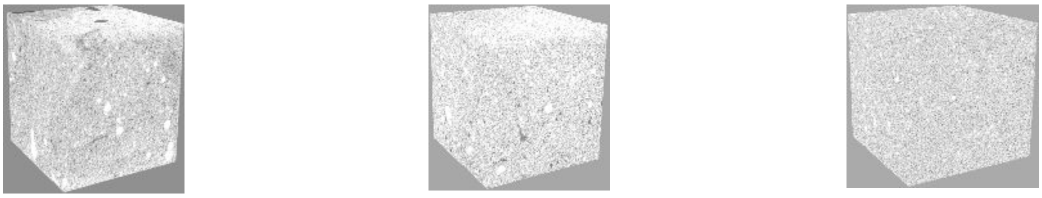
На рис. 5 приведены изображения внутренней структуры образцов пенобетона. Для получения плоского изображения трехмерного дискретного набора данных использована техника объемного рендеринга [32].

Отметим, что изображения на рис. 5 аналогичны приведенным в статье [21] и не уступают по качеству изображениям в работах [29, 31, 32].

Исследуемые параметры пенобетона, размеры пор, площади их сечений являются случайными величинами, зависимыми друг от друга, что вызывает потребность в получении информации о характере их распределений [12, 29, 31, 32].

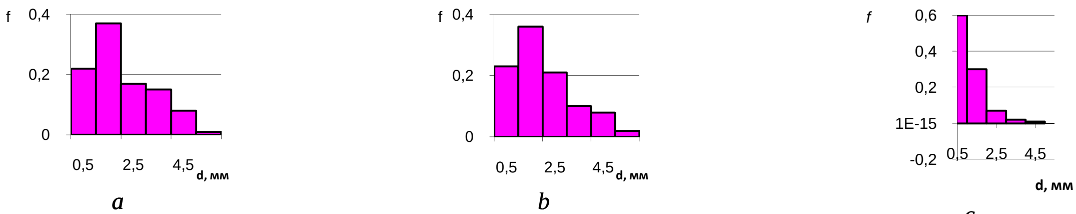
Отметим, что общая пористость и характер распределения пор по размерам определяют тепло- и звукоизоляционные свойства, а толщина межпоровой перегородки — конструктивные свойства пенобетона [11, 32].

На рис. 6 приведены выборочные плотности распределения эффективного диаметра пор для испытанных образцов пенобетона.



a *b* *c*

Рис. 5. Объемные изображения образцов после реконструкции: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2; *c* — образец № 3



a *b* *c*

Рис. 6. Распределение пор по диаметру: *a* — образец № 1; *b* — образец № 2; *c* — образец № 3

Из анализа данных, приведенных на рис. 6, можно сделать вывод о схожести распределения пор по размерам для образцов пенобетона № 1 и 2. В третьем образце превалируют поры диаметром 0,5 мм и менее. Образец с термомодифицированной торфяной добавкой ТМТ 600 выгодно отличается по структуре от других образцов пенобетона. При уменьшении размера пор более вероятно уменьшение теплопередачи в стеновых материалах за счет уменьшения конвективной составляющей. Это подтверждается результатами стандартных испытаний, а именно, образец пенобетона с добавкой ТМТ 600 обладает меньшей на 33,3 % теплопроводностью по сравнению со стандартным образцом.

Исследование характера пор по размерам и распределений по локальным объемам является сложной процедурой.

В работе [36] предложен алгоритм для оценки степени однородности структуры на основе анализа полутоновых изображений слоев пенобетона. Предложено усовершенствование алгоритма, которое сводится к превращению двумерной версии в трехмерную и анализу не полутоновых изображений, а объемного распределения пористости $\eta(x, y, z)$.

Алгоритм для оценки степени однородности пенобетона по пористости включает блок исходных данных, совокупность необходимых ограничений, последовательность действий.

Блок исходных данных состоит из распределения пористости $\eta(x, y, z)$ по объему образца V, минимального размера локального объема $n_{\min}$ и количества шагов по изменению размеров локальных объектов k_V.

Минимальный размер локального объема $n_{\min}$ должен быть сравним с превалирующим размером пор, обнаруживаемых в результате анализа структуры исследуемого образца пенобетона.

С целью оптимизации времени дополнительных вычислений можно ограничиться, например, минимальным размером $n_{\min} = 2000/d_w$ (количество пикселей на 2 мм) и при необходимости подкорректировать это значение в сторону увеличения.

Строго говоря, результатом применения алгоритма оценка степени однородности пенобетона по пористости является значение $n_{\lim} \geq n_{\min}$. Здесь $n_{\lim}$ — это размер локального объема испытуемого образца пенобетона, причем для всех локальных объемов испытуемых образцов с размером, превышающим $n_{\lim}$, выборочные оценки средних значений пористости близки друг к другу, то же справедливо и для среднеквадратических отклонений пористости. Значение $n_{\lim}$ является дополнительным параметром, характеризующим качество пенобетона, так как чем меньше значение этого параметра, тем более высокими функциональными характеристиками обладает испытуемый пенобетон.

Из анализа данных (рис. 6) следует, что максимальный диаметр пор $d_{\max}$ во всех трех образцах не превышает 5,5 мм.

С использованием алгоритма, приведенного выше, была подсчитана степень однородности пенобетона по пористости для размеров локального объема d = 2 мм; 3 мм; 4 мм; 5,5 мм. Степень однородности оценивалась по двум параметрам, $\bar{\eta}$ и $\sigma\eta$.

На рис. 7 приведены типичные изображения, иллюстрирующие степень однородности по средним значениям пористости $\bar{\eta}$ по локальным объемам для слоя толщиной d для образца пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой, который является лучшим по физико-механическим свойствам среди испытанных образцов (белым отмечены участки с аномальным отклонением пористости). На рис. 7 черным цветом обозначены участки, в которых пористость превышает среднюю на 0,1, а белым — занижение пористости на 0,1 (уплотнение).

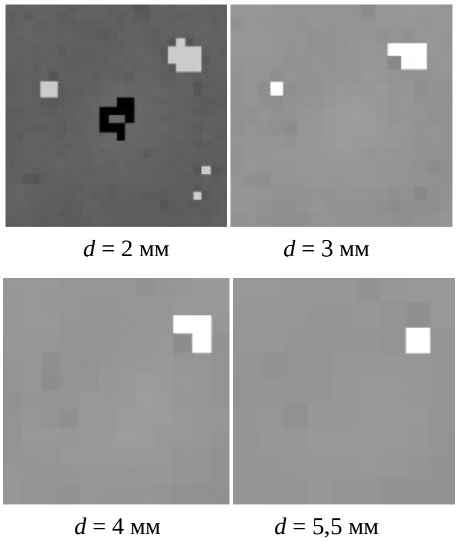


Рис. 7. Степень однородности по средним значениям пористости $\bar{\eta}$ по локальным объемам для слоя толщиной *d*

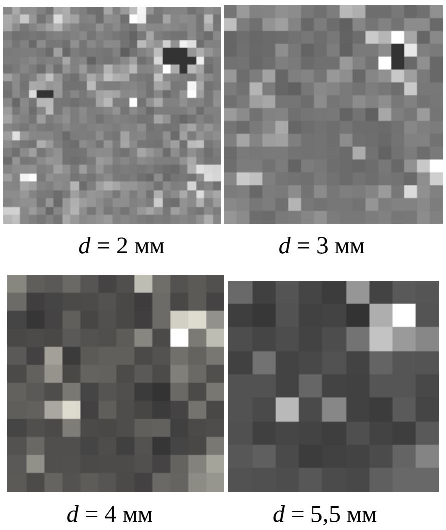


Рис. 8. Степень однородности по среднеквадратичным отклонениям пористости $\sigma\eta$ по локальным объемам для слоя толщиной *d*

Из анализа данных (рис. 7 и 8) можно сделать вывод о применимости метода компьютерной томографии к оценке степени однородности пенобетона по пористости по локальным объемам. Полученные результаты свидетельствуют о том, то образец пенобетона с термомодифицированной торфяной добавкой имеет более однородную пористую структуру, и можно прогнозировать снижение показателя изменчивости параметра прочность на сжатие при стандартных испытаниях образцов пенобетона, а также повышение класса бетона.

Оценка однородности пенобетона по средним значениям пористости является наиболее наглядной и рекомендуется для практического использования при разработке и внедрении инновационных технологических процессов и оценке их эффективности по критериям качества.

Заключение

Предложена методика интерпретации результатов компьютерной томографии применительно к исследованию конструкционно-теплоизоляционных пенобетонов. Разработан алгоритм оценки степени однородности пористой структуры пенобетона по локальным объемам, проведена его апробация при исследовании пенобетона. По результатам компьютерной томографии установлено, что введение термомодифицированной торфяной добавки в пенобетонную смесь способствует уменьшению размера пор, повышению однородности их распределения, что приводит к уменьшению теплопроводности и повышению прочности пенобетона.

Полученные результаты и рекомендации могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологий производства пенобетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Литература

1. Кудяков А.И., Копаница Н.О., Прищепа И.А., Шаньгин С.Н. Конструкционно-теплоизоляционные пенобетоны с термомодифицированной торфяной добавкой // Вестн. Том. гос. арх.-строительного ун-та. 2013. № 1. С. 172–177.

2. Hassan A.M.T., Jones S.W. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. P. 361–367.

3. Bartz W., Rogóż J., Rogal R., Cupa A., Szroeder P. Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Bożnów (SW Poland) //Construction and Building Materials. 2012. Vol. 30. P. 439–446.

4. Riggio M., Sandak J., Franke S. Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site // Construction and Building Materials. 2015. dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat. 2015.06.065.

5. Abina A., Puc U., Jeglič A., Zidanšek A. Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials //Applied Spectroscopy Reviews. 2015. Vol. 50, № 4. P. 279–303.

6. Hilal A.A., Thom N.H., Dawson A.R. The use of additives to enhance properties of pre-formed foamed concrete // Int J Eng Technol. 2015. Vol. 7, № 4. P. 286–293.

7. Прищепа И.А., Кудяков А.И. Цементный пенобетон с микропористыми минеральными и органоминеральными добавками. Международный журнал // Вестн. Евраз. Нац. ун-та им. Л.Н. Гумилева. Ч. 2 , № 4 (113). 2016. С. 496-499.

8. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. P. 113–127.

9. Liu M.Y.J., Alengaram U.J., Jumaat M.Z., Mo K.H. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete // Energy and Buildings. 2014. Vol. 72. P. 238–245.

10. Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., Ranjani G.I.S. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and concrete composites. 2009. Vol. 31, № 6. P. 388–396.

11. Kudyakov A., Prischepa I., Kiselev D., Prischepa B. Quality Control of Concrete at the stage of designing its Composition and technology // AIP Conference Proceedings 2. Сер. "Ad-

vanced Materials in Technology and Construction, AMTC 2015: Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction"" 2016. C. 070016. Scopus, WoS.

12. Nambiar E.K.K., Ramamurthy K. Air-void characterisation of foam concrete // Cement and concrete research. 2007. Vol. 37, № 2. P. 221–230.

13. Esmaily H., Nuranian H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag //Construction and Building Materials. 2012. Vol. 26, № 1. P. 200–206.

14. Абдрахимова Е.С., Абдрахимов В. Высокопористый теплоизоляционный материал на основе жидкого стекла // Физика и химия стекла. 2017. Т. 43, № 2. С. 222–230.

15. Moreno-Atanasio R., William R.A., Jia X. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials // Particuology. 2010. Vol. 8, № 2. P. 81–99.

16. Cnudde V., Boone M., Dewanckele J., Dierick M., Van Hoorebeke L., Jacobs P. 3D characterization of sandstone by means of X-ray computed tomography // Geosphere. 2011. Vol. 7, № 1. P. 54–61.

17. Kim K.Y., Yun T.S., Choo J., Kang D.H., Shin H.S. Determination of air-void parameters of hardened cement-based materials using X-ray computed tomography // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 37. P. 93–101.

18. Hassan N.A., Airey G.D., Hainin M.R. Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 54. P. 27–38.

19. Wei S., Yiqiang C., Yunsheng Z., Jones M.R. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 1278–1291.

20. Peng R., Yang Y., Ju Y., Mao L., Yang Y. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images // Chinese Science Bulletin. 2011. Vol. 56, № 31. P. 3346–3357.

21. Осипов С.П., Клименов В.А., Батранин А.В., Штейн А.М., Прищепа И.А. Применение цифровой радиографии и рентгеновской вычислительной томографии при исследовании строительных конструкций и в строительном материаловедении // Вестн. Том. гос. арх.-строительного ун-та. 2015. № 6. С. 116–127.

22. Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE, 2009.

23. Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences // Computers & Geosciences. 2001. Vol. 27, № 4. P. 381–400.

24. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // Physics in Medicine & Biology. 1976. Vol. 21, № 5. P. 733–744.

25. Ружинский С.А., Портик А.Б., Савиных А.В. Все о пенобетоне. СПб.: Стройбетон, 2006. 630 с.

26. Kudyakov A.I., Sarkisov Ju.S., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.F. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2015. Vol. 71. № 1 (012012). 7 p.

27. Прищепа И.А., Кудяков А.И., Копаница Н.О., Попов И.И., Иванова А.Б. Сырьевая смесь для приготовления пенобетона: пат. 2012150707/03 Рос. Федерация. № 2514069; заявл. 26.11.2012; опубл. 27.04.14, Бюл. № 12.

28. http://portal.tpu.ru/departments/laboratory/rknl/eng/products/orel_tomo (дата обращения: 16.03. 2018).

29. Chung S.Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches // Applied Sciences. 2017.Vol. 7, № 6. P. 550.

30. Landis E.N., Keane D.T. X-ray microtomography // Materials characterization. 2010. Vol. 61, № 12. P. 1305–1316.

31. Batool F., Bindiganavile V. Air-void size distribution of cement based foam and its effect on thermal conductivity // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. P. 17–28.

32. Verba C. Foamed Cement Interactions with CO2. – National Energy Technology Laboratory-In-house Research, 2017. Technical Report no. 20858. 44 p.

33. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Nguyen T., Kashani A., Van Deventer J.S. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H2O2: The impact of mix design // Materials & Design. 2017. Vol. 130. P. 381–391.

34. Подворчан Ю.А. Экспериментальное исследование структуры пенобетона на микротомографе «Орел-МТ» [Электронный ресурс]: бакалав. работа. Томск: ТПУ, 2016. 81 с. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/24794/1/ TPU 145729.pdf. (дата обращения: 10.02.2018).

35. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Nguyen T., Kashani, A., Van Deventer J.S. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H2O2: The impact of mix design // Materials & Design. 2017. Vol. 130. P. 381–391.

36. Podvorchan Yu.A. Experimental study of the structure of foam concrete on the microtomograph "Eagle-MT" [Электронный ресурс]: bachelor's work. Tomsk: TPU, 2016. 81 p. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/24794/1/ TPU 145729.pdf. (10.03. 2018).

References

1. Kudyakov A.I., Kopanica N.O., Prishepa I.A., Shangin S.N.Structural and heat-insulating foam concrete with thermo-modified peat additive // Vestnik ofTomsk State University of Architecture and Building. 2013. № 1. P. 172-177.

2. Hassan A.M.T., Jones S.W. Non-destructive testing of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC): A feasibility study for using ultrasonic and resonant frequency testing techniques // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 35. P. 361-367.

3. Bartz W., Rogoz J., Rogal R., Cupa A., Szroeder P. Characterization of historical lime plasters by combined non-destructive and destructive tests: The case of the sgraffito in Boznow (SW Poland) //Construction and Building Materials. 2012. Vol. 30. C 439-446.

4. Riggio M., Sandak J., Franke S. Application of imaging techniques for detection of defects, damage and decay in timber structures on-site // Construction and Building Materials. 2015. dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.06.065.

5. Abina A., Puc U., Jeglic A., Zidansek A. Applications of terahertz spectroscopy in the field of construction and building materials //Applied Spectroscopy Reviews. 2015. Vol. 50, № 4. P. 279-303.

6. Hilal A.A., Thom N.H., Dawson A.R. The use of additives to enhance properties of pre-formed foamed concrete // Int J Eng Technol. 2015. Vol. 7, № 4. P. 286-293.

7. Prishepa I.A., Kudyakov A.I.Cement foam with microporous mineral and organomineral additives. Mezhdunarodnyj zhurnal // Vestn. Evraz. Nac. un-ta im. L.N. Gumileva. Ch. 2, № 4 (113). 2016. P. 496-499.

8. Zhang Z., Provis J.L., Reid A., Wang H. Geopolymer foam concrete: an emerging material for sustainable construction // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. P. 113-127.

9. Liu M.Y.J., Alengaram U.J., Jumaat M.Z., Mo K.H. Evaluation of thermal conductivity, mechanical and transport properties of lightweight aggregate foamed geopolymer concrete // Energy and Buildings. 2014. Vol. 72. P. 238-245.

10. Ramamurthy K., Nambiar E.K.K., Ranjani G.I.S. A classification of studies on properties of foam concrete // Cement and concrete composites. 2009. Vol. 31, № 6. P. 388-396.

11. Kudyakov A., Prischepa I., Kiselev D., Prischepa B. Quality Control of Concrete at the stage of designing its Composition and technology // AIP Conference Proceedings 2. Ser. "Advanced Materials in Technology and Construction, AMTC 2015: Proceedings of the II All-Russian Scientific Conference of Young Scientists "Advanced Materials in Technology and Construction" 2016. P. 070016. Scopus, WoS.

12. Nambiar E.K.K., Ramamurthy K. Air-void characterisation of foam concrete // Cement and concrete research. 2007. Vol. 37, №2. P. 221-230.

13. Esmaily H., Nuranian H. Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag //Construction and Building Materials. 2012. Vol. 26, № 1. P. 200-206.

14. Abdrahimova E.S., Abdrahimov V.High-porosity heat-insulating material based on liquid glass. //Glass Physics and Chemistry. 2017. T. 43, № 2. P. 222-230.

15. Moreno-Atanasio R., William R.A., Jia X. Combining X-ray microtomography with computer simulation for analysis of granular and porous materials // Particuology. 2010. Vol. 8, № 2. P. 81-99.

16. Cnudde V., Boone M., Dewanckele J., Dierick M., Van Hoorebeke L., Jacobs P. 3D characterization of sandstone by means of X-ray computed tomography // Geosphere. 2011. Vol. 7, № 1. P. 54-61.

17. Kim K.Y., Yun T.S., Choo J., Kang D.H., Shin H.S. Determination of air-void parameters of hardened cement-based materials using X-ray computed tomography // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 37. P. 93-101.

18. Hassan N.A., Airey G.D., Hainin M.R. Characterisation of micro-structural damage in asphalt mixtures using image analysis // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 54. P. 27-38.

19. Wei S., Yiqiang C., Yunsheng Z., Jones M.R. Characterization and simulation of microstructure and thermal properties of foamed concrete // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. P. 1278-1291.

20. Peng R., Yang Y., Ju Y., Mao L., Yang Y. Computation of fractal dimension of rock pores based on gray CT images // Chinese Science Bulletin. 2011. Vol. 56, № 31. P. 3346-3357.

21. Osipov S.P., Klimenov V.A., Batranin A.V., Shtejn A.M., Prishepa I.A. Digital radiography and x-ray computerized tomography in building construction and construction materials science // Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building. 2015. № 6. P. 116-127.

22. Hsieh J. Computed tomography: principles, design, artifacts, and recent advances. Bellingham, WA: SPIE, 2009.

23. Ketcham R.A., Carlson W.D. Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences // Computers & Geosciences. 2001. Vol. 27, № 4. P. 381-400.

24. Alvarez R.E., Macovski A. Energy-selective reconstructions in x-ray computerised tomography // Physics in Medicine & Biology. 1976. Vol. 21, № 5. P. 733-744.

25. Ruzhinskij S.A., Portik A.B., Savinyh A.V. Vse o penobetone. SPb.: Strojbeton, 2006. 630p.

26. Kudyakov A.I., Sarkisov Ju.S., Kopanitsa N.O., Kasatkina A.V., Prischepa I.F. Foam concrete of increased strength with the thermomodified peat additives // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2015. Vol. 71. № 1 (012012). 7 p.

27. Prishepa I.A., Kudyakov A.I., Kopanica N.O., Popov I.I., Ivanova A.B. Raw material mixture for foam concrete: pat. 2012150707/03 Ros. Federaciya. № 2514069; zayavl. 26.11.2012; opubl. 27.04.14, Byul. № 12.

28. http://portal.tpu.ru/departments/laboratory/rknl/eng/products / orel_tomo (data obrasheniya: 16.03. 2018).

29. Chung S.Y., Lehmann C., Abd Elrahman M., Stephan D. Pore characteristics and their effects on the material properties of foamed concrete evaluated using micro-CT images and numerical approaches // Applied Sciences. 2017.Vol. 7, № 6. P. 550.

30. Landis E.N., Keane D.T. X-ray microtomography // Materials characterization. 2010. Vol. 61, № 12. P. 1305-1316.

31. Batool F., Bindiganavile V. Air-void size distribution of cement based foam and its effect on thermal conductivity // Construction and Building Materials. 2017. Vol. 149. P. 17-28.

32. Verba C. Foamed Cement Interactions with CO2. National Energy Technology Laboratory-In-house Research, 2017. Technical Report no. 20858. 44 p.

33. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Nguyen T., Kashani A., Van Deventer J.S. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H2O2: The impact of mix design // Materials & Design. 2017. Vol. 130. P. 381-391.

34. Podvorchan Yu.A.Experimental study of the structure of foam concrete on the microtomograph "Eagle-MT": bachelor's work [Elektronnyj resurs]. Tomsk: TPU, 2016. 81 p. URL: http://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/24794/1/TPU145729.pdf. (data obrasheniya: 10.02.2018).

35. Hajimohammadi A., Ngo T., Mendis P., Nguyen T., Kashani A., Van Deventer J.S. Pore characteristics in one-part mix geopolymers foamed by H2O2: The impact of mix design // Materials & Design. 2017. V. 130. P.381-391.

36.PodvorchanYu.A. Experimental study of the structure of foam concrete on the microtomograph "Eagle-MT": bachelor's work.Tomsk: TPU, 2016. 81 p. URL:http://earchive.tpu.ru/ bitstream/11683/24794/1/TPU145729.pdf.