

Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства

Инж. М. М. Мордич¹⁾

¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2019
Belarusian National Technical University, 2019

Реферат. В результате теоретических и экспериментальных исследований получен эффективный, не подверженный явлениям осадки и усадки теплоизоляционно-конструкционный материал – керамзитопенобетон в диапазоне основных применяемых в строительстве марок по средней плотности D300–D700, характеризующийся на 5–31 % большей прочностью и на 8–27 % модулем упругости, а также более высоким ($\leq 30,7$ %) уровнем паропроницаемости и влагоотдачи (на 17,4–46,7 %) при меньших (на 10,0–83,2 %) величинах водопоглощения, сорбционной влажности и теплопроводности по сравнению с ячеистым бетоном автоклавного твердения и пенобетоном равной плотности. Разработана трехстадийная технология приготовления керамзитопенобетона, на первой стадии которой готовят цементное тесто, куда при необходимости вводят оптимальное количество ускорителя твердения (1 % CaCl₂ от массы цемента) и уплотняющие структуру цементного камня (1 % Al₂SO₄ от массы цемента) добавки, предотвращающие осадку связующего (пенобетона) при последующем твердении, а в сочетании с 0,5 % от массы цемента «Гидроксипропилметилцеллюлозы УСК-200 ТТ» – и усадку пено- и керамзитопенобетона при последующем высыхании (высушивании). На второй стадии поризуют связующее, вводя в цементное тесто белковый пенообразователь Laston в оптимальном (в зависимости от заданной плотности) количестве примерно 0,5–1,3 % от массы цемента, а на третьей стадии в приготовленную пенобетонную смесь вводят керамзитовый гравий (в рациональном количестве примерно 0,7–0,8 м³ на 1 м³ керамзитопенобетона) при непрерывном смешивании в течение 60–90 с. Разработаны методики расчета состава пено- и керамзитопенобетона, обоснованы режимы формирования керамзитопенобетона высокой степени однородности (коэффициент вариации плотности и прочности $v_k \leq 6,2$ % при производственном формировании слоями высотой до 1500 мм), что подтверждает эффективность предлагаемой технологии.

Ключевые слова: цемент, пенообразователь, керамзит, пенобетон, керамзитопенобетон, технология, свойства, плотность, прочность, теплопроводность

Для цитирования: Мордич, М. М. Технология и физико-механические свойства керамзитопенобетона для монолитного и сборного строительства / М. М. Мордич // *Наука и техника*. 2019. Т. 18, № 4. С. 292–302. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-4-292-302>

Technology and Physico-Mechanical Properties of Claydite Foam Concrete for Monolithic and Prefabricated Construction

М. М. Mordzich¹⁾

¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Theoretical and experimental investigations have resulted in obtaining an effective insulating and structural material (claydite foam concrete) that is not subjected to slump and shrinkage in the range of main grades used in construction in terms of average density D300–D700, characterized by 5–31 % greater strength and 8–27 % elasticity modulus, as well as a higher (≤ 30.7 %) level of vapor permeability and moisture return (by 17.4–46.7 %) with lower values (by 10.0–83.2 %) of water absorption, sorption moisture and thermal conductivity in comparison with aerated concrete of autoclave hardening and foam concrete of equal density. A three-stage technology has been developed for preparing claydite foam concrete. At the first stage cement dough is prepared and if it is necessary an optimum amount of hardening accelerator (1 % CaCl₂ from cement mass) and additives condensing cement stone structure (1 % Al₂SO₄ from cement mass) are introduced into it, they prevent slump of a binder (foam concrete) during the subsequent hardening, and in combination with 0.5 % from cement mass “Hydroxypropylmethylcellulose УСК-200 ТТ” – and shrinkage of foam and claydite foam concrete during the subsequent drying. At the second stage, the binder is aerated while introducing protein-based foam agent (Laston) into the cement dough

Адрес для переписки

Мордич Михаил Михайлович
Белорусский национальный технический университет
ул. Ф. Скорины, 25, корп. 1
220114, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 369-75-84
niilbism@bntu.by

Address for correspondence

Mordzich Mikhail M.
Belarusian National Technical University
25, k. 1 F. Skoriny str.,
220114, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 369-75-84
niilbism@bntu.by

in an optimal amount (depending on the given density) 0.5–1.3 % from the cement mass; and at the third stage, expanded clay gravel is introduced into prepared foam concrete mixture (in rational amount of approximately 0.7–0.8 m³ per 1 m³ of claydite foam concrete) with continuous mixing for 60–90 seconds. Methodologies for calculation of foam- and claydite foam concrete compositions have been developed; molding modes of expanded clay foam concrete with high degree of homogeneity (variation coefficient of density and strength $\nu_k \leq 6.2$ % in the process of manufacturing molding with layer height up to 1500 mm) have been justified that confirms efficiency of the proposed technology.

Keywords: cement, foam-producing agent, claydite, foam concrete, claydite foam concrete, technology, properties, density, strength, heat conductivity

For citation: Mordzich M. M. (2019) Technology and Physico-Mechanical Properties of Claydite Foam Concrete for Monolithic and Prefabricated Construction. *Science and Technique*. 18 (4), 292–302. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2018-18-4-292-302> (in Russian)

Введение

Одной из важнейших задач при строительстве и эксплуатации жилищного фонда Республики Беларусь является обеспечение требований к теплоизолирующей функции наружных ограждающих конструкций зданий. Поэтому совершенствование технологии получения энергоэффективных стеновых материалов, которые сочетали бы низкую теплопроводность с достаточными прочностными характеристиками, т. е. обеспечивали рациональное сочетание теплоизолирующей и несущей функций, представляет актуальную задачу.

Приведенным критериям в наибольшей мере соответствуют легкие бетоны поризованной структуры, в частности производимые в нашей стране изделия из автоклавного ячеистого бетона на основе известково-кремнеземистого вяжущего с использованием извести-кипелки. Эта технология ориентирована на производство штучных изделий заводского изготовления. С расширением строительства из монолитного бетона появилась потребность в технологии ячеистого бетона, которая могла бы обеспечить условия возведения ограждающих конструкций с требуемым термическим сопротивлением теплопередаче монолитным способом. Традиционная технология ячеистого бетона такие условия не обеспечивает. В этой связи перспективно использование в монолитном строительстве ячеистого бетона, полученного с применением пенообразователей, т. е. пенобетона [1–3].

Однако в процессе исследований и практического использования выявились недостатки пенобетона, которые связаны с нестабильностью свойств пенобетонных смесей, что затем проявляется в повышенной осадке (и усадке) и неоднородности структуры и свойств затвердевшего материала, т. е. в уровне и постоянстве его физико-технических показателей, определяющих качество конечной продукции. Решение данной задачи заключается в создании конгломератного материала – керамзитопенобетона, полученного с применением особо легкого

керамзитового заполнителя ($\rho_0^k \leq 400$ кг/м³) и пенобетонного связующего со средней плотностью $\rho_{cp} \sim (200–800)$ кг/м³, что позволило получить материал с однородной (не подверженной осадке) структурой в диапазоне средней плотности 300–700 кг/м³, обеспечивающий требуемые теплофизические и прочностные характеристики для возводимых стеновых (внутренних и наружных) и иных строительных конструкций.

Технология приготовления поризованного связующего компонента – пенобетона

Для получения керамзитопенобетона с необходимыми свойствами в диапазоне марок по средней плотности D300–D700 нужно подобрать пенобетон с оптимальными физико-механическими свойствами. Учитывая, что плотность керамзитопенобетона зависит от средних плотностей обоих компонентов, а получение керамзита с насыпной плотностью менее 400 кг/м³ (и тем более, менее 300 кг/м³) проблематично, на первом этапе получили пенобетон в диапазоне марок D200–D600 (табл. 1).

В процессе исследований были определены наиболее рациональный (среди получивших предварительную оценку разновидностей пенообразователей) вид и оптимальное количество пенообразователя – Laston, составивший для пенобетона разных марок по плотности примерно 0,5–1,3 % от массы цемента (МЦ), который использовали в последующих экспериментах, обеспечивая получение пенобетона марок D200–D600. С целью снижения отрицательного эффекта осадки-усадки и повышения прочности затвердевшего пенобетона в состав вводили химические добавки различного функционального назначения. В результате экспериментально подобран комплекс из оцениваемых добавок ускорителей твердения CaCl₂ и Na₂SO₄ и уплотняющей структуру цементного камня добавки Al₂(SO₄)₃ (рис. 1, 2).

Физико-механические свойства пенобетона плотностью марок D200–D600 на синтетическом (ПБ 2000) и протеиновом (Laston) пенообразователях (для образцов 100×100×100 мм, выпиленных из 1000 мм призмы)
Physical and mechanical properties of foam concrete with density of D200–D600 grades on synthetic (ПБ 2000) and protein (Laston) frothers (for specimens 100×100×100 mm being cut-out from 1000 mm prism)

расчетная	Плотность			Среднее	ν, ρ_n	Предел прочности на сжатие в сухом состоянии, МПа			Среднее	ν, R_n
	фактическая в сухом состоянии					Нижний	Средний	Верхний		
	Нижний	Средний	Верхний							
D200	Полностью осел			–	–	–	–	–	–	
D200*	220	210	195	208	0,06	0,16	0,15	0,12	0,14	0,14
D300	Осадка в форме $h = 1000$ мм составила 46 %, или 460 мм									
D300*	310	300	298	303	0,02	0,33	0,32	0,29	0,32	0,07
D400	460	420	390	423	0,08	0,59	0,52	0,49	0,53	0,10
D400*	420	410	400	410	0,02	0,75	0,73	0,70	0,73	0,03
D500	550	530	496	525	0,05	1,15	0,95	0,81	0,97	0,17
D500*	515	502	498	505	0,02	1,36	1,32	1,28	1,32	0,03
D600	664	630	590	628	0,06	1,36	1,30	1,26	1,31	0,04
D600*	610	604	592	602	0,01	1,64	1,62	1,60	1,62	0,01

Примечание. Со звездочкой – применялся протеиновый пенообразователь Laston; без звездочки – синтетический ПБ 2000.

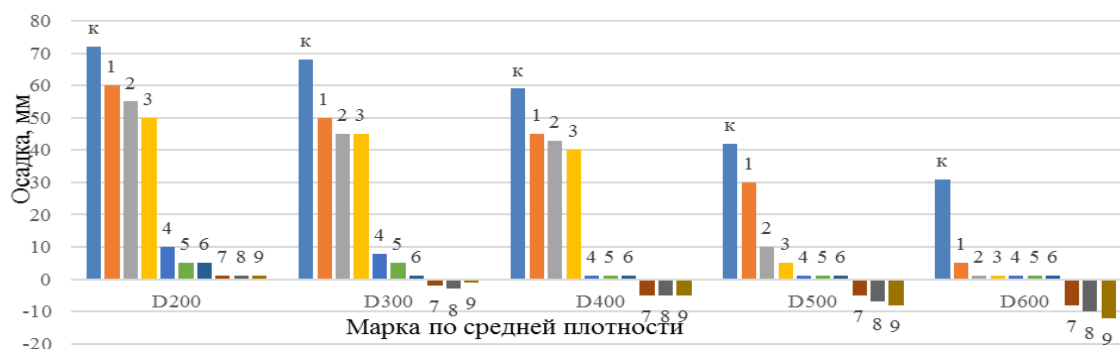


Рис. 1. Зависимость величины осадки пенобетона от вида и расхода добавки ускорителя твердения, в % от массы цемента, для различных марок по средней плотности D: 1 – 1,0 % Na_2SO_4 ; 2 – 2,0 % Na_2SO_4 ; 3 – 3,0 % Na_2SO_4 ; 4 – 1,0 % CaCl_2 ; 5 – 2,0 % CaCl_2 ; 6 – 3,0 % CaCl_2 ; 7 – 1,0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 8 – 2,0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 9 – 3,0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; к – контрольный состав без добавок

Fig. 1. Dependence of slump value for foam concrete on type and consumption of additive for hardening accelerator, in % by weight of cement, for various grades of average density D: 1 – 1.0 % Na_2SO_4 ; 2 – 2.0 % Na_2SO_4 ; 3 – 3.0 % Na_2SO_4 ; 4 – 1.0 % CaCl_2 ; 5 – 2.0 % CaCl_2 ; 6 – 3.0 % CaCl_2 ; 7 – 1.0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 8 – 2.0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; 9 – 3.0 % $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; к – control composition without additives

Влияние вида и количества вводимой в смесь добавки на свойства пенобетонной смеси и затвердевшего пенобетона оценивали по двум показателям:

– устойчивости к осадке «массива» из укладываемой за один прием в форму высотой 1000 мм (сечением 100×100 мм) пенобетонной смеси при твердении в течение 24 ч (рис. 1);

– изменению прочности пенобетона на сжатие в возрасте 3; 7 и 28 сут. (рис. 2).

Прочность определяли на образцах (по 6 шт. в серии) размерами 100×100×100 мм, отобран-

ных из средней части по высоте исходного «массива» пенобетона марок D200–D600, хранившихся до испытаний в камере нормально-влажностного твердения. Из результатов экспериментов следует, что развитие реакций вещества $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ с гипсовой составляющей цемента в водной среде с образованием крупных кристаллогидратов этрингита (при сопутствующем увеличении объема) способствует стабилизации структуры твердеющего камня. Этот вывод подтверждается незначительным ростом объема (высоты образцов с открытой верхней грани) пенобетона (рис. 1, поз. 7, 8, 9).

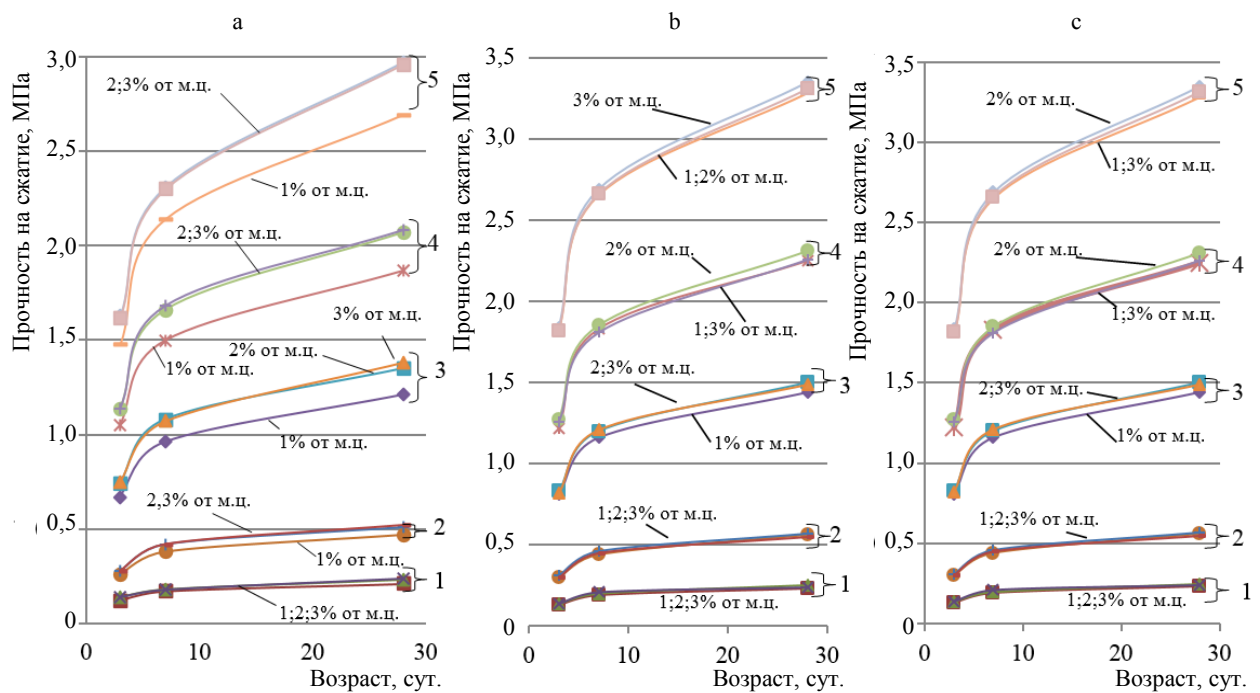


Рис. 2. Зависимость изменения прочности пенобетона на сжатие в возрасте 3, 7 и 28 сут. от вида добавки (а – Na_2SO_4 ; б – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; в – CaCl_2) и средней плотности пенобетона (1 – D200; 2 – D300; 3 – D400; 4 – D500; 5 – D600)

Fig. 2. Dependence of change in foam concrete strength in compression at age of 3, 7 and 28 days, on type of additive (а – Na_2SO_4 ; б – $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; в – CaCl_2) and average density of foam concrete (1 – D200; 2 – D300; 3 – D400; 4 – D500; 5 – D600)

Одновременно установлен рост температуры твердеющего пенобетона с добавками в сравнении с составом без них, который составил для Na_2SO_4 $\sim(2-3)$ °С, для CaCl_2 $\sim(4-5)$ °С и для $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ~ 7 °С, отражая нарастающую активизацию процесса гидратации цемента в их присутствии. Изменение прочности образцов (серии по 6 шт.) затвердевшего пенобетона с добавками (рис. 2) свидетельствует о примерно равной эффективности применения добавок $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и CaCl_2 , и меньшей – Na_2SO_4 .

Наиболее эффективным в пенобетоне оказался комплекс из добавок CaCl_2 и Al_2SO_4 в их оптимальной дозировке, составляющей 1 % CaCl_2 + 1 % Al_2SO_4 от МЦ, который обеспечил ускорение роста пластической прочности и схватывания пенобетонной смеси для всего диапазона марок пенобетона по средней плотности (D200–D600), а также способствовал повышению темпа роста и уровня прочности пенобетона указанных марок до 150–180 % (т. е. в 1,5–1,8 раза) [4]. Одновременно это сочетание добавок исключает осадку пенобетонной смеси, характерную для пенобетона без них в начальные сроки (1 сут.) твердения, а в более поздние сроки – ограничивает усадочные явления, включая влажностную усадку при высыхании пенобетона. Экспери-

ментально установлено, что в наибольшей мере эффективно их сочетание с добавкой метилцеллюлозы, в частности с «Гидроксипропилметилцеллюлозой УСК-200 ТТ» в дозировке 0,5 % от МЦ, что практически исключило усадку при высыхании пенобетона [5].

Также экспериментально выявлена эффективность (рис. 3) введения в пенобетон углеродного наноматериала (УНМ) белорусского производства, обеспечившего рост прочности пенобетона до 50 % к 7 сут. твердения и до 30 % – в проектом 28-суточном возрасте. Выявлена рациональная его разновидность (УНМ-ПХР) среди других, представленных разработчиком (ООО «Инновационные технологии», г. Минск) [6–8], а также установлены оптимальная дозировка этого вида УНМ, равная $(0,025 \pm 0,005)$ % от МЦ, и способ его введения в пенобетонную смесь в виде водной дисперсии, приготовленной на 1%-м растворе пластифицирующей добавки первой группы. Молекулы последней создают у поверхности частиц УНМ «экранирующую» оболочку, обеспечивая сохранение свойств пены, так как частицы УНМ без пластификатора способны снижать ее устойчивость («прорезать» пену).

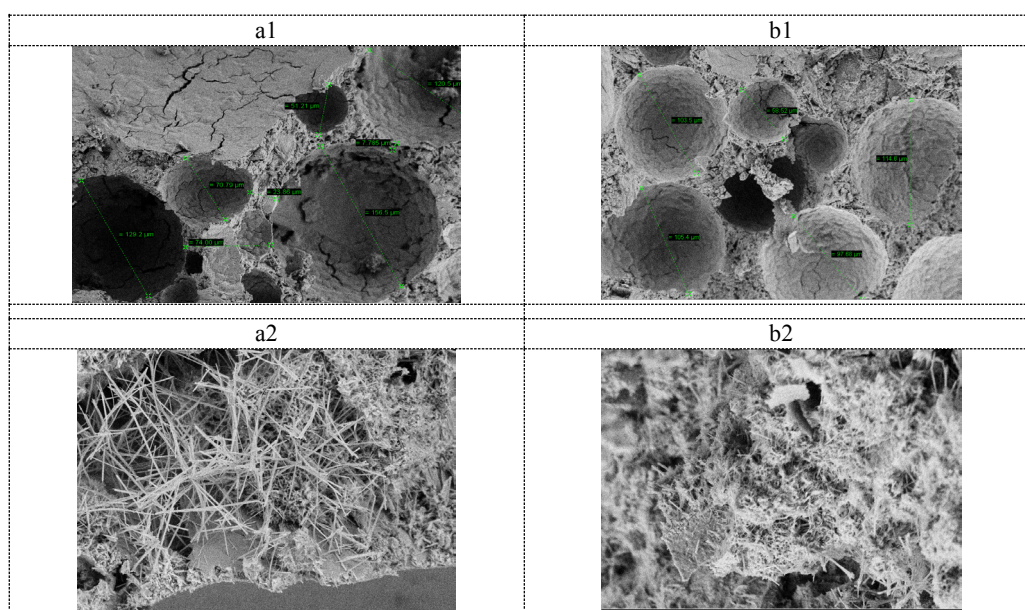


Рис. 3. Фотографии микроструктуры пенобетона на микроскопе SUPRA 55-30-44: a1, a2 – контрольный пенобетон при увеличении 20 мкм и 2 мкм в 1 см соответственно; b1, b2 – пенобетон с УНМ при увеличении 20 мкм и 2 мкм в 1 см

Fig. 3. Photos of foam concrete microstructure on SUPRA 55-30-44 microscope: a1, a2 – control foam concrete with increase of 20 μm and 2 μm in 1 cm, respectively; b1, b2 – foam concrete with CNM with increase of 20 μm and 2 μm in 1 cm

Результаты электронной микроскопии (рис. 3) свидетельствуют, что введение УНМ в пенобетон в оптимальной дозировке обеспечило формирование более упорядоченной микроструктуры цементного камня в стенках пор, а также макроструктуры пенобетона в целом, что и является основой роста его прочности.

Экспериментально выявленные особенности технологии получения пенобетона с заданными свойствами создали необходимые предпосылки для разработки технологии керамзитопенобетона.

Технология приготовления керамзитопенобетона

Выявлены зависимости формовочных свойств керамзитопенобетонных смесей (в диапазоне указанной средней плотности) от объемного содержания (расхода) керамзитового гравия (рис. 4).

В процессе экспериментов установлено, что метод определения формуемости керамзитопенобетонной смеси по осадке стандартного конуса не пригоден для оценки этого показателя, так как полученные данным методом результаты несопоставимы. Одновременно установили приемлемость использования оценки по распылу конуса (РК), обеспечившей сопоставимость результатов независимо от консистенции

керамзитопенобетонной смеси и изменения объемного содержания в нем керамзитового гравия (рис. 4). Из результатов экспериментов очевидна тенденция к снижению формуемости керамзитопенобетонной смеси с увеличением дозировки крупного керамзитового заполнителя (особенно, если его расход превышал 0,8 м³ на 1,0 м³ керамзитопенобетона), что предопределило необходимость использования пластифицирующих добавок.

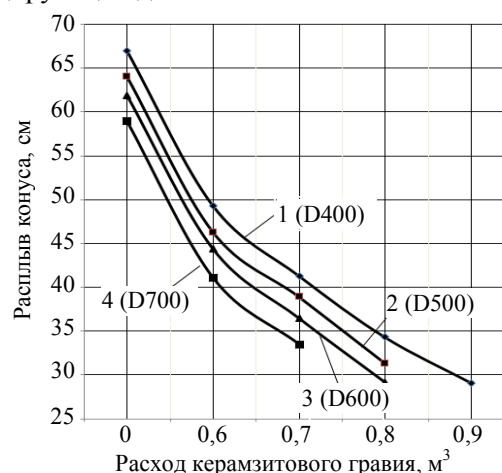


Рис. 4. Зависимость подвижности (пластичности) керамзитопенобетонной смеси от расхода керамзитового гравия

Fig. 4. Dependence of mobility (plasticity) for claydite foam concrete mix on consumption of expanded clay gravel

В графической интерпретации на рис. 5 приведены экспериментальные данные, отражающие влияние на формуемость керамзитопенобетонной смеси пластифицирующих добавок первой группы – суперпластификатора С-3 и добавки с повышенным водоредуцирующим эффектом – гиперпластификатора с маркировкой «Стахемент 2000» на примере смеси керамзитопенобетона средней плотностью марки D600.

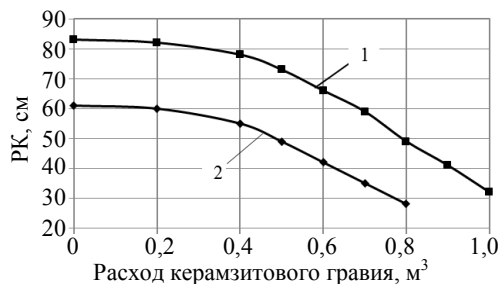


Рис. 5. Зависимость формуемости (пластичности) керамзитопенобетонной смеси от расхода керамзитового гравия и вида примененной добавки:
1 – 0,5 % «Стахемент-2000» от массы цемента;
2 – 2,0 % С-3 от массы цемента

Fig. 5. Dependence of formability (plasticity) of claydite foam concrete mix on consumption of expanded clay gravel and type of applied additive:
1 – 0.5 % “Stachement-2000” from MC;
2 – 2.0 % C-3 from MC

Выявлена тенденция роста эффективности пластификатора в смеси с повышением содержания в ней керамзита. По мнению автора, это связано с адсорбцией молекул ПАВ на поверхности зерен заполнителя и со снижением сил взаимодействия между его поверхностью и вязкопластичной массой пенобетонной смеси в зонах их контакта [4, 9, 10].

В результате установлено, что приемлемый для формирования керамзитопенобетонной смеси уровень расплыва конуса (≥ 30 см) может быть обеспечен при «предельном» объемном содержании в ней до 1 м^3 керамзитового гравия (рис. 5, график 1).

Одной из задач при разработке технологии получения и практического применения керамзитопенобетона однородной структуры и свойств являлось определение допустимой высоты слоя смеси, одновременно укладываемой в опалубку (форму). Оценку однородности структуры керамзитопенобетона осуществили по данным о скорости прохождения ультразвукового импульса (далее – скорости ультразвука) (ГОСТ 17624–2012), а также по величинам его средней плотности и прочности (ГОСТ 12730.1–78 и ГОСТ 10180–2012), определенным для разных участков высоты образцов, отформованных за один прием и имитирующих фрагмент стены размерами в плане 90×400 мм при высоте 800 мм (рис. 6).

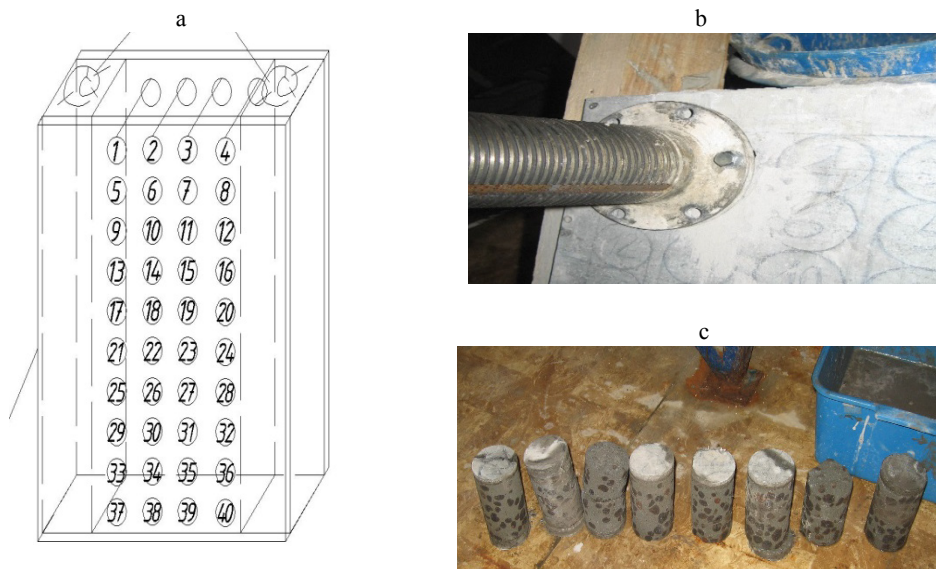


Рис. 6. Схема расположения мест оценки скорости ультразвука (а) и выбуривания (б) образцов (с) для оценки плотности и прочности

Fig. 6. Arrangement of locations for evaluating speed of ultrasound (a) and for cutting (b) out samples (c) for estimation of density and strength

Для оценки принят состав керамзитопенобетона марки D500 (содержащий $0,8 \text{ м}^3$ заполнителя), как примерно средний из диапазона марок D300–D700.

Экспериментально установлена стабильность свойств керамзитопенобетона по скорости прохождения ультразвука (в 40 точках) и по значениям средней плотности и прочности (на сжатие) при испытаниях образцов-цилиндров ($\text{Ø}60 \text{ мм}$, высота 90 мм ; в серии – 6 шт.), отобранных из образцов-блоков после проведения испытаний ультразвуком (табл. 2).

Полученные данные подтвердили высокую степень однородности структурного строения оцениваемого керамзитопенобетона, его плотности и прочности, а также отсутствие осадки слоя керамзитопенобетона высотой 800 мм в процессе твердения как в начальные сроки, так и в проектном возрасте. Для пенобетона такой результат был обеспечен использованием комплекса химических добавок $1 \% \text{ Al}_2(\text{SO}_4)_3 + 1 \% \text{ CaCl}_2$ (рис. 1), которых в рассматриваемом случае в пенобетонной составляющей не было. Очевидно проявление структурирующей роли «каркаса» из зерен керамзита в керамзитопенобетоне, а также то, что снижению осадки в начальный период и усадки при последующем твердении керамзитопенобетона способствовало снижение водотвердого (водоцементного) ($\Delta\text{В/Т}$) отношения за счет водоредуцирующего эффекта примененного пластификатора, составившего для $0,5 \% \text{ «Стахемент 2000»}$ $\sim 30 \%$. В итоге практически отсутствовала осадка данного образца и других, формуемых для последующих экспериментов.

Одновременно решали одну из задач исследований, заключающуюся в определении оптимального содержания (расхода) крупного заполнителя в керамзитопенобетоне с позиций влияния на свойства керамзитопенобетона. Результаты испытаний на прочность приведены в виде графиков на рис. 7 в зависимости от расхода керамзитового гравия. Образцы марок D400 (рис. 7, линия 1), D500 (линия 2) приготовлены на керамзитовом гравии фракции $4\text{--}10 \text{ мм}$, $\rho_{\text{кг}}^{\circ} = 370 \text{ кг/м}^3$, прочность при сдавливании в цилиндре $1,9 \text{ МПа}$ (производство ОАО «Завод керамзитового гравия», г. Ново-Лукомль), а марки D600 (линия 3) – на керамзито-

вом гравии фракции $4\text{--}10 \text{ мм}$, $\rho_{\text{кг}}^{\circ} = 530 \text{ кг/м}^3$, прочность при сдавливании в цилиндре $2,5 \text{ МПа}$ (производство Петриковского керамзитового завода ОАО «Гомельский ДСК»). При этом экспериментально выявлена неоднозначная зависимость средней плотности и прочности керамзитопенобетона от соотношения плотности и прочности связующего (пенобетона) и керамзитового гравия. Установлено, что для получения керамзитопенобетона марок D400 и D500 на особо легком керамзите ($\rho_{\text{кг}}^{\circ} = 370 \text{ кг/м}^3$, прочность $1,9 \text{ МПа}$) следует использовать пенобетон соответствующей средней плотности, но не более D500, и прочностью не менее $2,0 \text{ МПа}$. При этом прочность на сжатие керамзитопенобетона возрастает с увеличением дозировки гравия вплоть до $1,0 \text{ м}^3$ керамзитопенобетона (рис. 7, линии 1, 2). С ростом средней плотности (марки D600 и более) необходимо использовать более прочный заполнитель (при сдавливании в цилиндре не менее $2,5 \text{ МПа}$), а в качестве связующего – пенобетон соответствующей марки по средней плотности, либо даже меньшей плотности (но не менее D350), при прочности не менее $1,2 \text{ МПа}$. Эти положения были учтены при разработке методики расчета составов керамзитопенобетона в диапазоне марок D300–D700. По совокупности приведенных экспериментальных данных сделан вывод, что оптимальное объемное содержание крупного заполнителя в керамзитопенобетоне соответствует примерно $0,7\text{--}0,8 \text{ м}^3$ на $1,0 \text{ м}^3$ бетона, и последующие исследования были выполнены на составах с учетом этого фактора.

Разработанный керамзитопенобетон – конструкционно-теплоизоляционный материал, для применения которого необходимы расчетные физико-механические характеристики, в частности – модуль упругости. Экспериментально установленная зависимость изменения модуля упругости керамзитопенобетона в диапазоне марок D400–D700 приведена на рис. 8. Для сравнения показаны его величины для равной средней плотности газосиликатного бетона по данным М. З. Симонова и С. М. Ицковича [11, 12] и для пенобетона – по данным И. Х. Назашвили и В. С. Дорофеева [13, 14].

Результаты испытаний керамзитопенобетона марки D500 на однородность

Test results on claydite foam concrete of D500 grade for uniformity

№ ряда при отборе образцов по высоте	Среднее значение			Величина коэффициента вариации, отражающая однородность керамзитопенобетона, доли ед. (%)				
	v_{cp} , м/с	ρ_{cp} , кг/м ³	Прочность на сжатие, МПа	По скорости ультразвука			По средней плотности	По прочности
				По горизонтали	По вертикали	Средняя		
1 (верх)	2261,67	498	2,61	0,0316 (3,16)	0,0313 (3,13)	0,0314 (3,14)	0,0119 (1,2)	0,0415 (4,15)
2	2365,5	502	2,62					
3	2439,25	503	2,69					
4	2489,25	504	2,61					
5	2491,08	508	2,62					
6	2475,75	511	2,68					
7	2457,67	512	2,65					
8 (низ)	2411,75	516	2,65					

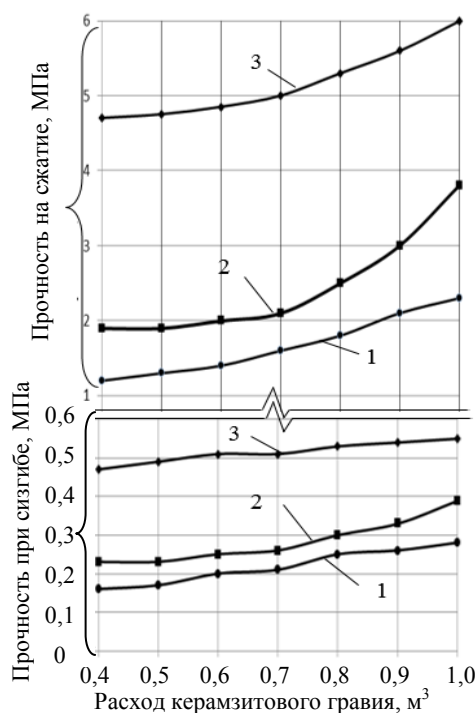


Рис. 7. Тенденция изменения прочности керамзитопенобетона

Fig. 7. Tendency to change strength of claydite foam concrete

Очевидно, что по упругим свойствам керамзитопенобетон не только не уступает, но и несколько превосходит газосиликатный бетон автоклавного твердения (рис. 8, линия 2) и, тем более, пенобетон (линия 3).

Далее были определены основные эксплуатационные свойства керамзитопенобетона (во-

допоглощение, влагоотдача, сорбционная влажность, паропроницаемость, теплопроводность и термическое сопротивление), подтверждающие возможность и эффективность его использования в наружных ограждающих конструкциях (табл. 3).

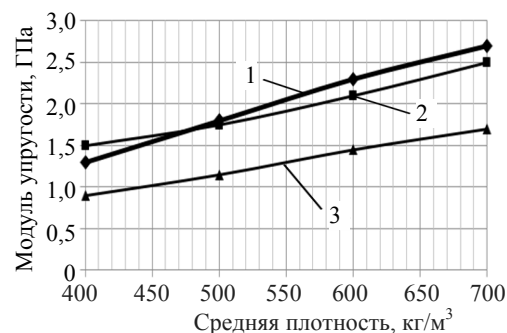


Рис. 8. Значения модуля упругости для: 1 – керамзитопенобетона во взаимосвязи с его средней плотностью; 2 – газосиликатного бетона; 3 – пенобетона

Fig. 8. Values of elastic modulus for: 1 – expanded clay foam concrete in relation to its average density; 2 – gas silicate concrete; 3 – foam concrete

При проектировании и устройстве наружных ограждающих конструкций из керамзитопенобетона следует обеспечивать требуемую величину термического сопротивления. На территории Республики Беларусь оно, согласно ТКП 45-2.04-43-2006, должно быть не менее $R_m \sim 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$, с перспективой дальнейшего повышения. В расчетах исходили из предположения, что керамзитопенобетон будет исполь-

зоваться в варианте устройства однослойной ограждающей конструкции, так как это наиболее экономически целесообразно. В этой связи при оценке обеспечиваемого термического сопротивления стен (или иных конструкций) разной толщины, возведенных (устроенных) из керамзитопенобетона разных марок по плотности, в расчет принимали только слой керамзитопенобетона (табл. 4).

Согласно данным табл. 4, требуемый коэффициент термического сопротивления ($R_m \geq 3,2 \text{ м}^2 \cdot \text{°C}/\text{Вт}$) обеспечивается одним слоем

керамзитопенобетона толщиной от ~290 мм до ~570 мм в диапазоне марок от D300 до D700 соответственно, что меньше (за счет меньшей теплопроводности), чем для пено- и газобетона равных марок по средней плотности. При этом керамзитопенобетон обеспечивает (как это установлено проведенными исследованиями) возможность возведения монолитных стеновых конструкций в опалубке с высокой степенью однородности свойств по высоте конструкций и темпом ведения бетонных работ.

Таблица 3

Физико-механические и эксплуатационные свойства керамзитопенобетона при расходе керамзитового гравия ~0,8 м³
Physical and mechanical and operational properties of claydite foam concrete with consumption of ~0,8 m³ expanded claydite gravel

Наименование показателя	Свойство керамзитопенобетона в зависимости от марок по средней плотности			
	D400	D500	D600	D700
Прочность на сжатие (кубиковая), МПа	1,8	2,5	5,3	5,9
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	0,25	0,30	0,53	0,61
Призменная прочность, МПа	1,3	2,3	3,4	4,3
Модуль упругости, ГПа	1,3	1,8	2,3	2,7
Водопоглощение (по массе), %	47,3	31,9	23,3	20,2
Сорбционная влажность, %, при:				
$\varphi_{\text{возд}} \sim 40$	–	0,89	–	–
$\varphi_{\text{возд}} \sim 60$	–	1,12	–	–
$\varphi_{\text{возд}} \sim 100$	–	5,32	–	–
Влагоотдача (до стабилизации), %	21,8	14,1	11,1	10,3
Паропроницаемость, мг/(м·ч·Па)	0,260	0,241	0,231	0,219
Теплопроводность*, Вт/(м·°C)	0,099	0,121	0,137	0,177
* Для марки D300 – $\lambda \sim 0,09 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{°C})$.				

Таблица 4

Расчетный коэффициент термического сопротивления строительных конструкций при устройстве их из керамзитопенобетона
Estimated coefficient of thermal resistance of building structures while making them from expanded clay foam concrete

Коэффициент термического сопротивления, м ² ·°C/Вт	Толщина слоя, м, керамзитопенобетона, обеспечивающая данное термическое сопротивление в зависимости от его средней плотности				
	D300	D400	D500	D600	D700
3,2	0,288	0,317	0,387	0,438	0,566
4,0	0,360	0,396	0,484	0,548	0,708
5,0	0,450	0,495	0,605	0,685	0,885

ВЫВОДЫ

1. Разработанная трехстадийная технология получения и применения в строительстве керамзитопенобетона марок по средней плотности D300–D700 обладает преимуществом по физико-механическим характеристикам и эксплуатационным свойствам перед известными бетонами – аналогами ячеистой структуры. Установленные режимы двухстадийного приготовления пенобетонного связующего марок по средней плотности D200–D800 с требуемыми свойствами, обеспечивающими затем заданные качественные характеристики и свойства керамзитопенобетона в диапазоне марок D300–D700, приготавливаемого на третьей стадии путем введения в пенобетонную смесь керамзитового гравия в объеме 0,7–1,0 м³ при непрерывном смешивании в течение 60–90 с.

2. Выявлены наиболее эффективный вид и оптимальная дозировка (примерно 0,5–1,3 % от массы цемента в зависимости от марки по средней плотности) белкового пенообразователя Laston, а также наиболее рациональное сочетание ускорителя твердения CaCl₂ и уплотняющей структуру цементного камня добавки Al₂SO₄ и их оптимальная дозировка (1 % CaCl₂ + 1 % Al₂SO₄), которая обеспечивает исключение осадки пенобетонной смеси, характерной для пенобетона без этих добавок, в начальные сроки (1 сут.) твердения, а в более поздние сроки – ограничивает усадочные явления, включая влажностную усадку при его высушивании. Кроме этого, указанный комплекс добавок способствует повышению темпа роста и уровня прочности пенобетона до 150–180 % (т. е. в 1,5–1,8 раза), а в сочетании с добавкой «Гидроксипропилметилцеллюлоза УСК-200 ТТ» (в дозировке 0,5 % от массы цемента) практически исключает усадку при высушивании как пенобетона, так и керамзитопенобетона.

3. Установлена возможность повышения прочности связующего (пенобетона) до 50 % к 7 сут. твердения и до 30 % – в проектном 28-суточном возрасте за счет введения в состав углеродного наноматериала (УНМ-ПХР) в оптимальной дозировке (0,025 ± 0,005) % от массы цемента; разработан способ его введения в виде водной дисперсии, предварительно приготовленной на 1%-м водном растворе добавки пла-

стификатора первой группы (суперпластификатора). Выявлено, что адсорбция молекул ПАВ пластификатора на поверхности частиц УНМ обеспечивает его эффективность в пенобетоне; в противном случае частицы УНМ «прорезают» пену и прочность пенобетона снижается.

4. Выявлено, что полученный по разработанной технологии керамзитопенобетон на 5–31 % характеризуется большими значениями прочности и на 8–27 % – модуля упругости, на 10,0–83,2 % меньшими величинами водопоглощения и сорбционной влажности, а также обладает более высокой (на ≤30,7 %) способностью к влагоотдаче и паропроницаемости (на 17,4–46,7 %) при меньшей (на 5–12 %) теплопроводности в сопоставлении с газосиликатным ячеистым бетоном автоклавного твердения и пенобетоном равных марок по средней плотности [15].

5. Производственная апробация результатов исследований подтвердила эффективность разработки за счет снижения материало- и трудоемкости возведения (устройства) конструкций зданий. Общий экономический эффект при объеме реализации керамзитопенобетона в 3020 м³ составил около 33915 дол. США (по курсу на декабрь 2018 г.).

ЛИТЕРАТУРА

1. Жуков, Д. Д. Теплоизоляционные материалы и изделия / Д. Д. Жуков // Белорусский строительный рынок. 1999. № 14. С. 2–7.
2. Лыгач, И. О. Новые материалы и технологии для строительства зданий из легких энергоэффективных конструкций / И. О. Лыгач, М. М. Мордич // Архитектура и строительство. 2009. № 3. С. 34–37.
3. Лыгач, И. О. Новые материалы и технологии для возведения легких энергоэффективных зданий / И. О. Лыгач, М. М. Мордич // Белорусский строительный рынок. 2008. № 8. С. 8–11.
4. Мордич, М. М. Влияние ускорителей твердения на физико-механические показатели качества пенобетона для монолитного строительства / М. М. Мордич // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров: материалы XX Междунар. науч.-метод. сем. ГрГУ имени Я. Купалы, Гродно, 2016 г. Гродно, 2016. С. 147–152.
5. Мчедолов-Петросян, О. П. Расширяющиеся составы на основе портландцемента (химия и технология) / О. П. Мчедолов-Петросян. М.: Стройиздат, 1965. 137 с.
6. Батяновский, Э. И. Теоретические предпосылки и эффективность использования углеродных наноматериалов в цементном бетоне / Э. И. Батяновский, П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович // Проблемы современного

- бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. / редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: Минсктиппроект, 2009. Ч. 2: Технология бетона. С. 100–117.
7. Рябчиков, П. В. Перспективы применения углеродных наноматериалов в технологии тяжелого бетона / П. В. Рябчиков, Э. И. Батяновский // ALITinform – Международное аналитическое обозрение «Цемент. Бетон. Сухие смеси». 2015. Т. 41, № 6. С. 26–35.
 8. Батяновский, Э. И. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах / Э. И. Батяновский, М. М. Мordich, Г. С. Галузо // Наука – образованию, производству и экономике: материалы IX Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 2011 г. Минск: БНТУ, 2011. С. 272–273.
 9. Киселев, Д. П. Поризованные легкие бетоны / Д. П. Киселев, А. А. Кудрявцев. М.: Стройиздат, 1966. 81 с.
 10. Тихомиров, В. Н. Пены. Теория и практика их получения и разрушения / В. Н. Тихомиров. М.: Химия, 1983. 264 с.
 11. Симонов, М. З. Основы технологии легких бетонов / М. З. Симонов. М.: Стройиздат, 1973. 584 с.
 12. Ицкович, С. М. Легкие бетоны / С. М. Ицкович, Г. С. Галузо. Минск, 1981. 25 с.
 13. Наназашвили, И. Х. Строительные материалы, изделия и конструкции / И. Х. Наназашвили. М.: Высш. шк., 1990. С. 140–150.
 14. Прочностные и деформативные свойства бетонов и конструкций на пористых заполнителях юга Украины / В. С. Дорофеев [и др.] // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. тр.: в 2 ч. / Мин-во стр-ва и арх. Респ. Беларусь, Науч.-исслед. респ. предпр. по стр-ву «Институт БелНИИС»; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]. Минск: Минсктиппроект, 2009. Ч. 2: Технология бетона. С. 189–207.
 15. Кривицкий, М. Я. Ячеистые бетоны: технология, свойства и конструкции / М. Я. Кривицкий, Н. И. Левин, В. В. Макаричев. М.: Стройиздат, 1972. 136 с.
- Поступила 22.03.2019
Подписана в печать 29.05.2019
Опубликована онлайн 31.07.2019
- REFERENCES
1. Zhukov D. D. (1999) Thermal-Insulating Materials. *Belorussky Stroitelny Rynok* [Belarusian Construction Market], (14), 2–7 (in Russian).
 2. Lygach I. O., Mordich M. M. (2009) New Materials and Technologies for Construction of Buildings From Light Power-Efficient Structures. *Arkhitektura i Stroitelstvo* [Architecture and Construction], (3), 34–37 (in Russian).
 3. Lygach I. O., Mordich M. M. (2008) New Materials and Technologies for Construction of Light Energy-Saving Buildings. *Belorussky Stroitelny Rynok* [Belarusian Construction Market], (8), 8–11 (in Russian).
 4. Mordich M. M. (2016) Influence of Hardening-Accelerating Agent on Physical and Mechanical Indices of Foam Concrete Quality for Cast-In-Situ Construction. *Perspektivy Razvitiya Novykh Tekhnologii v Stroitel'stve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov: Materialy XX Mezhdunar. Nauch.-Metod. Sem. GrGU imeni Ya. Kupaly, Grodno, 2016 g.* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel: Proceedings of XX International Scientific and Methodological Workshop of Yanka Kupala State University of Grodno, 2016]. Grodno, 2016, 147–152 (in Russian).
 5. Mchedolov-Petrosyan O. P. (1965) *Portland Cement-Based Expanding Composition (Chemistry and Technology)*. Moscow, Stroyizdat Publ. 137 (in Russian).
 6. Batyanovsky E. I., Ryabchikov P. V., Yakimovich V. D. (2009) Theoretical Prerequisites and Efficiency for Use of Carbonic Nano-Materials in Cement Concrete. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Tr. Ch. 2. Tekhnologiya Betona* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Collected Papers. Part 2. Concrete Technology] Minsk, Minsktipproyekt Publ., 100–117 (in Russian).
 7. Ryabchikov P. V., Batyanovsky E. I. (2015) The Prospects of Application of Carbon Nanomaterials in the Heavy Concrete Technology. *ALITinform – Mezhdunarodnoe Analiticheskoe Obzrenie "Tsement. Beton. Sukhie Smesi" = ALITinform – International Analytical Review "Cement. Concrete. Dry Mix"*, 41 (6), 26–35 (in Russian).
 8. Batyanovsky E. I., Mordich M. M., Galuzo G. S. (2011) Peculiar Features for Application of Carbonic Nano-Materials in Constructional and Thermal Insulation Foam Concrete. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu i Ekonomike: Materialy IX Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Konf., Minsk, 2011 g.* [Science for Education, Industry and Economics: Proceedings of IX International Scientific and Technical Conference, Minsk, 2011]. Minsk, Belarusian National Technical University, 272–273 (in Russian).
 9. Kiselev D. P., Kudryavtsev A. A. (1966) *Light-Weight Porous Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 81 (in Russian).
 10. Tikhomirov V. N. (1983) *Foam. Theory and Practice for its Obtaining and Destruction*. Moscow, Khimiya Publ. 264 (in Russian).
 11. Simonov M. Z. (1973) *Fundamentals of Technology for Light-Weight Concrete*. Moscow, Stroyizdat Publ. 584 (in Russian).
 12. Itskovich S. M., Galuzo G. S. (1981) *Light-Weight Concrete*. Minsk, 1981. 25 (in Russian).
 13. Nanazashvili I. Kh. (1990) *Construction Materials, Products and Structures*. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 140–150 (in Russian).
 14. Dorofeev V. S. [et al.] Strength and Deformative Properties of Concrete and Structures with Porous Aggregates of South Ukraine. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona: Sb. Tr. Ch. 2. Tekhnologiya Betona* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete: Collected Papers. Part 2. Concrete Technology]. Minsk, Minsktipproyekt Publ., 189–207 (in Russian).
 15. Krivitsky M. Ya., Levin N. I., Makarichev V. V. (1972) *Cellular Concrete: Technology, Properties and Structures*. Moscow, Stroyizdat Publ., 136 (in Russian).
- Received: 22.03.2019
Accepted: 29.05.2019
Published online: 31.07.2019