DOI 10.15593/2409-5125/2018.03.06

УДК 691.327.32

Г.В. Сопегин, Н.С. Семейных

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ТЕЧЕНИЕ ЩЕЛОЧНО-СИЛИКАТНОЙ РЕАКЦИИ В ЛЕГКИХ БЕТОНАХ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА

Гранулированное пеностекло является современным эффективным пористым заполнителем, способным обеспечить высокие прочностные и теплозащитные свойства легких бетонов на его основе. Главной проблемой в таких бетонах может стать щелочно-силикатная реакция. В результате ее длительного протекания происходит снижение прочности и разрушение материала. Поэтому решение данной проблемы является актуальным направлением в технологии производства легких бетонов на реакционно-способных заполнителях, к одному из которых относится гранулированное пеностекло. В статье представлены результаты исследования возможности снижения протекания щелочно-силикатной реакции, возникающей в легких бетонах на основе гранулированного пеностекла. Для оценки протекания такой реакции в работе применялся метод, который основывается на исследовании микроструктуры заранее приготовленных образцов легкого бетона. При анализе микроструктуры образцов контрольного состава были обнаружены новообразования игольчатой формы на границе раздела фаз «заполнитель–цементный камень». Данный факт позволил судить о наличии в легком бетоне щелочно-силикатного взаимодействия. Для снижения вероятности протекания щелочно-силикатной реакции было предложено вводить в состав легкого бетона комплексную добавку, состоящую из метакрилатов и пластификатора С-3. После введения комплексной добавки наблюдается улучшение однородности микроструктуры бетона и значительное уменьшение игольчатых новообразований, что свидетельствует о снижении щелочно-силикатной реакции. Данная добавка также позволила улучшить показатели прочности при сжатии, средней плотности и теплопроводности легкого бетона.

Ключевые слова: гранулированное пеностекло, легкие бетоны, метакрилат, микроструктура, пластификатор С-3, прочность при сжатии, средняя плотность, теплопроводность, щелочно-силикатная реакция.

Из всего спектра существующих в настоящее время пористых заполнителей для легких бетонов особое место занимает гранулированное пеностекло (ГПС), обладающее лучшим сочетанием физико-механических

Сопегин Г.В., Семейных Н.С. Исследование влияния комплексной добавки на течение щелочно-силикатной реакции в легких бетонах на основе гранулированного пеностекла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. – 2018. – № 3. – С. 68–78. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.03.06

Sopegin G., Semeynykh N. Investigation of the influence of complex additive on the degree of alkali-silica reaction course in lightweight concrete based on granulated foam glass. PNRPU. Applied ecology. Urban development. 2018. No. 3. Pp. 68-78. DOI: 10.15593/2409-5125/2018.03.06

и теплотехнических свойств по сравнению со своим ближайшим аналогом – керамзитовым гравием [1–4]. Использование ГПС в легких бетонах (ГПС-бетонах) позволяет обеспечить им класс по прочности В2,5-В5 при марке по средней плотности от D500 до D1500 [3, 5, 6].

Важной проблемой в ГПС-бетонах является возможное протекание щелочно-силикатной реакции (ЩСР), возникающей за счет взаимодействия щелочей цемента с аморфным кремнеземом, содержащимся в большом количестве в ГПС [7–10]. В результате таких реакций при длительной эксплуатации бетона образуется щелочно-силикатный гидрогель, состоящий из низкополимерных ионов кремниевых кислот и катионов натрия, калия и кальция [7, 8]. Содержание последнего обуславливает способность геля поглощать воду, увеличиваясь при этом в объеме. Увеличения объема щелочно-силикатного гидрогеля приводит к расширению бетонных конструкций, вследствие чего может произойти снижение прочности и разрушение бетона [9, 10].

Наиболее эффективным способом снижения вероятности протекания ЩСР является применение высокореакционных пуццолановых добавок [11, 12]. В качестве одной из таких добавок можно использовать метакаолин, который способен взаимодействовать с гидроксидом кальция, образующимся при твердении цемента. В результате этого взаимодействия в бетоне растет число новообразований, способствующих улучшению структуры, а также повышению физико-механических и теплотехнических характеристик легкого бетона [12–14].

Следует отметить, что вследствие высокой дисперсности частиц ($S_{уд} > 12\,000\text{ см}^2/\text{г}$) метакаолин приводит к возрастанию водопотребности бетонных смесей. Снизить влияние этого негативного фактора возможно путем совместного применения водоредуцирующих добавок [12], к которым, в частности, относится добавка на основе солей нафталинсульфокислот – пластификатор С-3.

Таким образом, актуальным представляется диагностирование склонности ГПС-бетона к протеканию ЩСР, а также определение влияния комплексной добавки (метакаолина и пластификатора С-3) на протекание такой реакции. Одним из способов, позволяющих определить протекание в ГПС-бетоне ЩСР, являются исследования его микроструктуры [8, 9, 15].

Цель работы: с помощью исследования микроструктуры образцов ГПС-бетона оценить вероятность протекания в них щелочно-силикатного взаимодействия и определить возможность его снижения путем применения комплексной добавки, состоящей из метакаолина и пластификатора С-3.

Задачи работы:

1) провести сравнительный анализ микроструктуры образцов ГПС-бетона контрольного (бездобавочного) состава и состава с комплексной добавкой;

2) определить возможность снижения протекания ЩСР путем введения в состав ГПС-бетона комплексной добавки;

3) оценить влияние комплексной добавки на технические свойства ГПС-бетона (прочность при сжатии, среднюю плотность и теплопроводность).

Материалы и методы исследования. В исследовании использовались следующие материалы:

1) гранулированное пеностекло фракции 5–10 и 10–20 мм с маркой по насыпной плотности М200-М250 и маркой по прочности при сдавливании в цилиндре П20-П35;

2) песок кварцево-полевошпатовый Заостровского карьера, г. Пермь, насыпная плотность 1485 кг/м³, модуль крупности $M_k = 1,96$;

3) портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5 Б (марка по прочности М400) производства ОАО «Горнозаводскцемент», соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2016;

4) метакаолин ВМК-40;

5) пластификатор С-3 по требованиям ТУ 5745-001-97474489–2007;

6) вода по ГОСТ 23732–2011.

Характеристика метакаолина ВМК-40:

удельная поверхность – 12630 см²/г;

массовая доля SiO₂ – 50,9 %;

массовая доля Al₂O₃ – 47,0 %;

массовая доля Fe₂O₃ – 0,78 %;

пуццоланическая активность – 1013 мг Ca(OH)₂/г;

потери при прокаливании – менее 1 %.

Для исследования микроструктуры были изготовлены образцы ГПС-бетона в соответствии с ГОСТ 27006–86, а также с учетом рекомендаций, приведенных в литературе [5, 11].

Из анализа литературных данных [12–14] следует, что метакаолин оказывает наибольший эффект при введении в состав бетонной смеси в количестве от 5 до 15 %. В данной работе дозировка метакаолина составила 5, 10 и 15 % при замене соответствующего количества цемента.

Согласно ТУ 5745-001-97474489–2007, рекомендуемая дозировка пластификатора С-3 составляет 0,35–0,8 % от массы вяжущего. Начальная подвижность бетонной смеси задавалась пределах 1–4 см и обеспечива-

лась за счет введения пластификатора С-3 с корректировкой расхода воды. В результате опытных замесов было установлено, что необходимая дозировка пластификатора С-3 для всех образцов с комплексной добавкой составляет 0,5 % от массы цемента.

Характеристика составов бетонной смеси для изготовления образцов ГПС-бетона приведена в таблице.

Характеристика составов бетонной смеси

Наименование	Ед. изм.	Контрольный состав	Состав № 2	Состав № 3	Состав № 4
ГПС (фр. 5–10 мм)	кг/м ³	233	233	233	233
ГПС (фр. 10–20 мм)	кг/м ³	155	155	155	155
Цемент	кг/м ³	286	271,7	257,4	243,1
Песок	кг/м ³	583	583	583	583
Вода	л/м ³	172	100,1	100,1	100,1
Метакаолин	%	–	5	10	15
	кг/м ³	–	14,3	28,6	42,9
Пластификатор С-3	%	–	0,5	0,5	0,5
	кг/м ³	–	1,43	1,43	1,43
Осадка конуса	см	1...4	1...4	1...4	1...4

Прочность при сжатии и средняя плотность образцов-кубов ГПС-бетона определялись по ГОСТ 10180–2012 и ГОСТ 12730.1–78 соответственно. Коэффициент теплопроводности ГПС-бетона был определен при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076–99.

Исследования микроструктуры образцов ГПС-бетона проводились по истечении 2 месяцев хранения при температуре 20 ± 2 °С и относительной влажности воздуха 95 ± 2 %. Микроструктура определялась с помощью сканирующего электронного микроскопа высокого разрешения фирмы HITACHI марки S-3400N.

Результаты испытаний. Микроструктура образцов ГПС-бетона контрольного состава при увеличении от $\times 500$ до $\times 3000$ представлена на рис. 1.

На рис. 1 видно, что структура ГПС-бетона является рыхлой, в ней отмечается присутствие аморфных включений гидросиликатов кальция (рис. 1, в, поз. 6, 7), что свидетельствует о полноте протекания реакций гидратации цемента. Стоит отметить, что присутствующие на рассматриваемых снимках (рис. 1, а, б, поз. 1, 3, 4) образцов плоские или призматические кристаллические образования портландита или гидроксида кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), а также продукты его карбонизации – кристаллы карбоната кальция (рис. 1, а, поз. 2) – отмечаются только в цементно-песчаном растворе.

Рис. 1. Микроструктура образцов ГПС-бетона контрольного состава: *а* – зона с цементно-песчаным раствором, увеличение $\times 1000$; *б* – граница раздела цементно-песчаного раствора с ГПС фр. 5–10 мм, увеличение $\times 500$; *в* – то же, с ГПС фр. 10–20 мм, увеличение $\times 500$; *г* – то же, с ГПС фр. 5–10 мм, увеличение $\times 3000$

Отсутствие подобных образований на границе раздела фаз заполнитель – цементный камень можно объяснить тем, что гидроксид кальция вступает во взаимодействие с аморфным кремнеземом, содержащимся в ГПС. В результате этой реакции образуются новообразования преимущественно игольчатой формы, которые можно наблюдать на рис. 1, *б*, *в*, *г*, поз. 5, 8–11. Из научных источников [7–10, 15] известно, что в результате щелочно-силикатного взаимодействия в легких бетонах на границе раздела фаз пористый заполнитель – цементный камень могут появляться различные минералы, имеющие игольчатую форму. Из этого следует, что обнаруженные при исследовании микроструктуры игольчатые новообразования свидетельствуют о протекании ЩСР в теле бетона.

Как было сказано выше, ЩСР при длительной эксплуатации бетона могут привести к снижению его прочности и дальнейшему разрушению. Поэтому на следующем этапе исследования оценивалась возможность сни-

жения протекания подобных реакций путем введения в состав ГПС-бетона комплексной добавки, состоящей из метаксаолина и пластификатора С-3. Микроструктура ГПС-бетона с комплексной добавкой с указанием границы раздела между заполнителем и цементным камнем представлена на рис. 2.

Рис. 2. Микроструктура образцов ГПС-бетона при увеличении $\times 1000$ после введения комплексной добавки, содержащей метаксаолин в количестве: *а* – 5 %; *б* – 10 %; *в* – 15 %

На рис. 2 видно, что с увлечением количества метаксаолина в составе комплексной добавки структура ГПС-бетона становится более однородной по сравнению со структурой контрольного состава. Степень уплотнения в зоне контакта ГПС с цементным камнем с увеличением содержания в комплексной добавке метаксаолина также повышается, а при достижении максимального количества – граница в зоне контакта практически отсутствует. Наблюдается рост кристаллов гидросиликатов кальция у частиц метаксаолина, а также уменьшение количества пластинок портландита за счет их взаимодействия с метаксаолином. Последнее приводит к уменьшению числа новообразований игольчатой формы на границе раздела фаз

заполнитель – цементный камень, что в результате будет способствовать снижению интенсивности протекания ЦСР.

В ходе исследований также оценивалось влияние комплексной добавки на технические свойства ГПС-бетона: прочность при сжатии, среднюю плотность и теплопроводность. Изменение этих показателей в зависимости от количества комплексной добавки в ГПС-бетоне представлено на рис. 3.

Рис. 3. Зависимость технических свойств ГПС-бетона от количества комплексной добавки

Анализ данных рис. 3 показал, что комплексная добавка способствует повышению предела прочности при сжатии ГПС-бетона по сравнению с контрольным составом. Наилучший эффект достигается при содержании в комплексной добавке 5 % метаксаолина (ВМК). В этом случае прочность ГПС-бетона возрастает на 2,21 МПа.

Ранее было сказано, что повышение прочности цементных систем при введении метаксаолина обусловлено его взаимодействием с гидроксидом кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, образующимся при твердении цемента. При активном связывании метаксаолином гидроксида кальция увеличивается коли-

чество химически связанной воды и растет число новообразований в цементном камне [12–14]. Для эффективного прохождения этого процесса необходимо значительное количество $\text{Ca}(\text{OH})_2$, источником которого служит цементный клинкер. Очевидно, что при замене части цемента большим содержанием метакеолина в ГПС-бетоне уменьшается количество образующегося $\text{Ca}(\text{OH})_2$, с которым должен взаимодействовать метакеолин. В результате большая часть метакеолина выполняет роль инертной добавки в цементном камне. Следствием этого является небольшое снижение прочности ГПС-бетона, что подтверждается результатами проведенных испытаний.

Результаты определения теплотехнических свойств показывают, что при введении комплексной добавки теплопроводность ГПС-бетона изменяется пропорционально величине его средней плотности, изменение которой обуславливается увеличением в структуре легкого бетона количества пор, содержащих газовую фазу. Последнее, в свою очередь, определяет теплозащитные свойства материала. На рис. 3 видно, что с уменьшением средней плотности ГПС-бетона его теплопроводность снижается с 0,282 до 0,218 Вт/м·К в зависимости от содержания комплексной добавки.

Таким образом, совместное использование метакеолина и пластификатора С-3 не только снижает скорость щелочно-силикатной реакции, но и улучшает технические свойства ГПС-бетонов, что позволяет повысить их эффективность при использовании в качестве ограждающих конструкций в зданиях и сооружениях различного назначения.

Выводы:

1. Анализ микроструктуры ГПС-бетона контрольного состава показал, что на границе между гранулированным пеностеклом и цементным камнем наблюдаются новообразования игольчатой формы, которые являются результатом взаимодействия гидроксида кальция с аморфным кремнеземом заполнителя, вследствие чего возникает щелочно-силикатная реакция.

2. Исследование микроструктуры ГПС-бетона после введения в его состав комплексной добавки, состоящей из метакеолина и пластификатора С-3, позволило выявить значительное уменьшение игольчатых новообразований на границе раздела фаз заполнитель – цементный камень за счет связывания пластинок гидроксида кальция метакеолитом, что приводит к снижению протекания щелочно-силикатной реакции. На данном этапе отмечается также улучшение однородности структуры ГПС-бетона по сравнению с контрольным составом.

3. Совместное использование метакрилатов и пластификатора С-3 способствует улучшению физико-механических и теплотехнических показателей качества ГПС-бетона, что позволяет повысить его эффективность при использовании в стеновых ограждающих конструкциях зданий и сооружений различного назначения.

Библиографический список

1. Бруссер М.И. Заполнители для бетона: современные требования к качеству // Строительные материалы. – 2004. – № 10. – С. 62–63.
2. Семейных Н.С., Сопегин Г.В., Федосеев А.В. Оценка физико-механических свойств пористых заполнителей для легких бетонов // Вестник МГСУ. – 2018. – Т. 13, № 2(113). – С. 203–212.
3. Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams / E. Bernardo, R. Cedro, M. Florean, S. Hreglich // *Ceramics International*. – 2006. – Vol. 33, no. 6. – P. 963–968.
4. Limbachiya M., Meddah M., Fotiadou S. Performance of granulated foam glass concrete // *Construction and Building Materials*. – 2012. – No. 28. – P. 759–768.
5. Давидюк А.Н. Конструкционно-теплоизоляционные бетоны на стекловидных пористых заполнителях для эффективных ограждающих конструкций // Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – 2008. – № 4. – С. 100–108.
6. Легкие бетоны на основе пеностекла, модифицированные наноструктурами / М.Ю. Попов, С.Ю. Петрунин, В.Е. Ваганов, Л.В. Закревская // *Нанотехнологии в строительстве: интернет-журнал*. – 2012. – № 6. – С. 41–56. – URL: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2012_RUS.pdf (дата обращения: 01.06.2018).
7. Брыков А.С. Щелочно-силикатные реакции и коррозия бетона // Цемент и его применение. – 2009. – № 5. – С. 31–37.
8. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete / G. Bumanisa, D. Bajarea, J. Locsb, A. Korjakins // *Construction and Building Materials*. – 2013. – No. 47. – P. 274–281.
9. Rivard P., Saint-Pierre F. Assessing alkali-silica reaction damage with nondestructive methods: from the lab to the field // *Constr. Build. Mater.* – 2009. – No. 23(2). – P. 902–909.
10. Щелоче-силикатная коррозия в легких бетонах на цементном вяжущем с пористым заполнителем на основе гранулированного пеностекла / А.С. Брыков, В.Е. Ваганов, Б.Г. Ким, М.Ю. Попов // Цемент и его применение. – 2015. – № 4. – С. 89–93.
11. Попов М.Ю. Подбор состава легких бетонов на реакционно-способных пористых заполнителях // Научное обозрение. – 2015. – № 16. – С. 162–167.
12. Метакаолин – эффективная минеральная добавка для бетонов / Л.И. Дворкин, В.В. Житковский, О.Л. Дворкин, А.Р. Разумовский // *Технологии бетонов*. – 2015. – № 9-10. – С. 21–24.
13. Боровских И.В., Морозов Н.М. Влияние метакрилатов на свойства цементных систем // Известия КГАСУ. – 2015. – № 3(33). – С. 127–132.
14. Искандарова А.Ф., Красиникова Н.М., Степанов С.В. Исследование влияния метакрилатов на прочность бетона // *Инновационная наука*. – 2015. – № 7-1 (7). – С. 41–43.
15. Alkali aggregate reactions in LWAC – introductory laboratory testing / J. Lindgard, H. Justnes, M. Haugen, P. Dahl // SINTEF report SBF52 F06004. – Trondheim, Norway, 2006. – P. 189.

References

1. Brusser M.I. Zapolniteli dlya betona: sovremennyye trebovaniya k kachestvu [Aggregates for concrete: modern quality requirements]. *Stroitel'nye materialy*, 2004, no. 10, pp. 62-63.
2. Semeynykh N.S., Sopenin G.V., Fedoshev A.V. Otsenka fiziko-mekhanicheskikh svoystv poristyykh zapolniteley dlya legkikh betonov [Evaluations of physical and mechanical properties of porous aggregates for lightweight concrete]. *Vestnik MGSU*, 2018, vol. 13, no. 2(113), pp. 203-212.
3. Bernardo E., Cedro R., Florean M., Hreglich S. Reutilization and stabilization of wastes by the production of glass foams. *Ceramics International*, 2006, vol. 33, no. 6, pp. 963–968.

4. Limbachiya M., Meddah M., Fotiadou S. Performance of granulated foam glass concrete. *Construction and Building Materials*, 2012, no. 28, pp. 759-768.
5. Davidyuk A.N. Konstruktsionno-teploizolyatsionnyye betony na steklovidnykh poristyykh zapolnitelyakh dlya effektivnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy [Construction heat-insulating concretes on glassy porous aggregates for effective filler structures]. *Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura*, 2008, no. 4, pp. 100-108.
6. Popov M.Yu., Petrunin S.Yu., Vaganov V.E., Zakrevskaya L.V. Legkiye betony na osnove penostekla, modifitsirovannyye nanostrukturami [The lightweight granulated foam glass concrete modified by nanostructures]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve (internet-zhurnal)*, 2012, no. 6, pp. 41-56. Available at: http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2012_RUS.pdf. Accessed: June 01, 2018.
7. Brykov A. S. Shchelochno-silikatnyye reaktsii i korroziya betona [Alkali-silicate reactions and corrosion of concrete]. *Tsement i ego primeneniye*, 2009, no. 5, pp. 31-37.
8. Bumanisa G., Bajarea D., Locsb J., Korjakins A. Alkali-silica reactivity of foam glass granules in structure of lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, no. 47, pp. 274-281.
9. Rivard P., Saint-Pierre F. Assessing alkali-silica reaction damage with nondestructive methods: from the lab to the field. *Constr Build Mater*, 2009, no. 23(2), pp. 902-909.
10. Brykov A.S., Vaganov V.E., Kim B.G., Popov M.Yu. Shchelochno-silikatnaya korroziya v legkikh betonakh na tsementnom vyazhushchem s poristym zapolnitelem na osnove granulirovannogo penostekla [Alkali-silicate corrosion in lightweight concretes on a cement binder with porous aggregates based on granulated foam glass]. *Tsement i ego primeneniye* [Cement and its application], 2015, no. 4, pp. 89 – 93.
11. Popov M.Yu. Podbor sostava legkikh betonov na reaktsionnosposobnykh poristyykh zapolnitelyakh [Selection of lightweight concrete compositions with reactive porous aggregates]. *Nauchnoe obozrenie*, 2015, no. 16, pp. 162-167.
12. Dvorkin L.I., Zhitkovskiy V.V., Dvorkin O.L., Razumovskiy A.R. Metakaolin – effektivnaya mineral'naya dobavka dlya betonov [Metakaolin – effective mineral additive for concrete] // *Tekhnologii betonov*, 2015, no. 9-10, pp. 21-24.
13. Borovskikh I.V., Morozov N.M. Vliyaniye metakaolina na svoystva tsementnykh sistem [The influence of metakaolin on the properties of cement systems]. *Izvestiya KGASU*, 2015, no. 3(33), pp. 127-132.
14. Iskandarova A.F., Krasnikova N.M., Stepanov S.V. Issledovaniye vliyaniya metakaolina na prochnost' betona [Investigation of influence of a metakaolin on the concrete strength]. *Innovatsionnaya nauka*, 2015, no. 7-1 (7), pp. 41-43.
15. Lindgard J., Justnes H., Haugen M., Dahl P. Alkali aggregate reactions in LWAC – introductory laboratory testing. *SINTEF report SBF52 F06004*, Trondheim, Norway, 2006, p. 189.

Получено 1.07.2018

G. Sopegin, N. Semeynykh

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF COMPLEX ADDITIVE ON THE DEGREE OF ALKALI-SILICA REACTION COURSE IN LIGHTWEIGHT CONCRETE BASED ON GRANULATED FOAM GLASS

Granulated foam glass is the modern effective porous aggregate capable to provide high strength and heat-insulating properties to lightweight concretes on its basis. The main problem in such concretes can be alkali-silica reaction. Its long occurrence is resulted in decrease in strength and destruction of material. Therefore, the solution of this problem is a topical direction in the production technology of lightweight concretes on reactive aggregates, such as granulated foam glass. The article contains the results of research of the possibility of reducing the course of alkali-silica reaction occurring in lightweight concretes based on the granulated foam glass. To evaluate the occurrence of such

reaction in the work a special method was used. Its essence is to study the microstructure of pre-prepared lightweight concrete samples. In the analysis of microstructure of control composition samples on the aggregate and cement stone interface boundary of needle-shaped growths were found. This fact allows assuming the presence of alkali-silica interaction in lightweight concrete. To reduce the probability of alkali-silica reaction, it was proposed to introduce a complex additive consisting of metakaolin and plasticizer S-3 into the compositions of lightweight concrete. After the introduction of complex additive, there was observed an improvement of concrete microstructure homogeneity and a significant reduction in needle-shaped growths. This indicates a decrease in the course of the alkali-silica reaction. The complex additive also allowed improving the compressive strength, average density and thermal conductivity of lightweight concrete.

Keywords: granulated foam glass, lightweight concretes, metakaolin, microstructure, plasticizer S-3, compressive strength, average density, thermal conductivity, alkali-silica reaction.

Сопегин Георгий Владимирович (Пермь, Россия) – магистрант кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: sp.georg@yahoo.com).

Семейных Наталья Сергеевна (Пермь, Россия) – канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: semeyn@mail.ru).

Sopegin Georgij (Perm, Russian Federation) – Master Student of Department of Construction Engineering and Material Science, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: sp.georg@yahoo.com).

Semeynykh Natal'ya (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical sciences, Associate Professor of Department of Construction Engineering and Material Science, Perm National Research Polytechnic University (614990, Perm, Komsomolsky av., 29, e-mail: semeyn@mail.ru).