УДК 691.327.3:691.175.746

© М. В. Акулова, д-р техн. наук, профессор,
советник РААСН

© Т. Е. Слизнева, д-р техн. наук, доцент
(Ивановский государственный политехнический
университет)
E-mail: m_akulova@mail.ru, tatjanaslizneva@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-3-103-111

© M. V. Akulova, Dr. Sci. Tech., Professor,
RAACS Counsellor

© T. E. Slizneva, Dr. Sci. Tech., Associate Professor
(Ivanovo State Polytechnical University)
E-mail: m_akulova@mail.ru, tatjanaslizneva@mail.ru

ПОЛИСТИРОЛБЕТОН НА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТНОМ ВЯЖУЩЕМ С ДОБАВЛЕНИЕМ ЖИДКОГО СТЕКЛА И ШАМОТА

POLYSTYRENE CONCRETE ON PORTLAND CEMENT BINDER WITH THE ADDITION OF LIQUID GLASS AND CHAMOTTE

Проанализирован российский и зарубежный опыт применения пенополистирола в производстве легких бетонов. Рассмотрены способы управления физико-механическими свойствами полистиролбетона. Установлено, что введение в состав полистиролбетона жидкого стекла и шамота способствует не только повышению прочности материала, но и сохранению ее после высокотемпературного воздействия. Методом планирования эксперимента определен рациональный состав композита на основе полистирола, портландцемента и огнеупорных добавок.

Ключевые слова: полистиролбетон, жидкое стекло, шамот, прочность при сжатии, термостойкость.

Russian and foreign experience of using foam polystyrene in light weight concrete manufacture is reviewed. Methods of control of polystyrene concrete physical-mechanical properties are studied. It has been established, that addition of liquid glass and chamotte into the composition of polystyrene concrete contributes not only to the strength of the material, but also to its preservation after high-temperature exposure. The rational composition of the composite based on polystyrene, Portland cement and refractory additives was determined by the method of experiment planning.

Keywords: polystyrene concrete, liquid glass, chamotte, compressive strength, thermal stability.

В соответствии с намеченной стратегией развития строительной отрасли (Распоряжение Правительства РФ от 10 мая 2016 г. № 868-р), в том числе жилищного строительства, на ближайшие годы большое внимание должно уделяться производству конкурентоспособных строительных материалов, обеспечивающих экономию энерго- и материальных ресурсов, а также комфортное проживание, пожарную и экологическую безопасность. Наряду с традиционными тяжелыми бетонами в последнее время широко используются бетоны на легких заполнителях, отличающиеся большей энергоэффективностью, лучшей звукоизоляцией [1]. Поэтому разработ-

ка составов легких бетонов, обеспечивающих наряду с хорошей тепло- и звукоизоляцией повышение прочности сцепления наполнителя с вяжущим, а также термостойкости материала, является актуальной задачей.

К легким бетонам относятся бетоны, имеющие плотность от 200 до 2000 кг/м³, которые можно получить при использовании пористых заполнителей либо поризацией самой цементной матрицы (пенобетон, газобетон) [2].

Среди пористых заполнителей, применяемых в мировой практике, наиболее экономичным является вспененный полистирол [3]. Использование пенополистирола (ППС) в производстве

строительных материалов обусловлено, по меньшей мере, двумя причинами. Первая связана с необходимостью утилизации полистирола — очень легкого био- и водостойкого материала, нетоксичного, не вступающего в химические реакции в обычных атмосферных условиях [4, 5]. В основе второй причины лежит необходимость в легковесных блоках, используемых в качестве стенового и облицовочного материала, уменьшающих общий вес конструкции и значительно облегчающих нагрузку на фундамент в малоэтажных зданиях [6].

В пользу пенополистирола говорит не только его устойчивость к химическим атакам, к грибкам и микроорганизмам [4], но и способность к звуко- и теплоизоляции, высокие показатели морозостойкости [6–14]. Кроме того, полистиролбетон способен выдерживать большую по сравнению с обычным бетоном ударную нагрузку [15]. При разрушении полистиролбетона образуется более дисперсный паттерн растрескивания, что свидетельствует о способности полистиролбетона поглощать больше энергии [16].

Применение ППС насчитывает многолетнюю историю [17]. После открытия стиропора в середине прошлого столетия в Германии и успешного применения его в составе бетона стали очевидны основные недостатки данного заполнителя — слабый контакт со штукатурным слоем и снижение прочности композита. Однако если специальными исследованиями было установлено, что оштукатуривание полистиролбетона более рентабельно, чем оштукатуривание газобетона или ячеистого керамзитобетона [18], то проблема повышения прочности полистиролбетона не решена до сих пор.

Замена части мелкого заполнителя, как правило, природного песка, вспененными полистирольными гранулами неизменно приводит к потере прочности полистиролбетона [19–21]. Причем можно утверждать, что существует обратно пропорциональная зависимость между количеством ППС и прочностью композита [22]. Причину снижения прочности бетона, содержащего вспененный полистирол, автор [23] видит в плохом сцеплении цементного теста и ППС.

Для усиления зоны контакта цементного камня с полистирольными гранулами многие исследователи предложили использовать гидрофиль-

ные добавки: латекс [24]; поликарбоксилатный пластификатор [25], сульфанол и костный клей [26]; суперпластификатор С-3, карбоксиметилцеллюлозу, поливинилацетат, акриловый полимер, пек талловый омыленный, бутадиенстирольный латекс, смолу древесную омыленную с последующим окатыванием ППС гранул в цементе [27].

Однако в работе [26] показано, что разрушение бетона происходит не по линии контакта цементного камня с заполнителем, а разрушаются сами гранулы. При этом большую прочность при сжатии показали образцы, в состав которых входили гранулы меньшего размера, хотя сцепление в таком бетоне было слабее, чем в бетоне, содержащем гранулы большего размера. Влияние размера гранул пенополистирола на прочность камня нельзя признать простым и однозначным, поскольку в литературе имеются противоречивые данные. Так, в [28] установлено, что прочность полистиролбетона тем выше, чем крупнее гранулы ППС, в то время как в работах [20, 29, 30] отмечено повышение прочности бетона при уменьшении размера гранул. В исследованиях [31] применялись две фракции полистирольных гранул: 0...2 мм и 2...4 мм в одном и том же составе бетона.

С целью повышения прочностных характеристик пенополистирольного композита была предпринята попытка уплотнить гранулы ППС [21, 32]. В результате был получен новый материал, названный авторами стабилизированный полистирол (SPS), который состоит из 80 % вспененного полистирола, 10 % глины и 10 % цемента. Прочность композита, содержащего SPS, выше, чем у бетона с обычными ППС гранулами, но все-таки ниже, чем прочность при сжатии традиционного бетона. В России успешно применен прием троекратного вспенивания полистирола в производстве сверхлегкого полистиролбетона [12].

Хорошие результаты в аспекте повышения прочностных характеристик были получены при введении в состав полистиролбетонных смесей микрокремнезема и золы уноса [19, 33–35], полипропиленовых волокон [31, 34], стальной фибры [29, 36]. При этом отмечено, что применение микрокремнезема совместно с пластификатором снижает расслаиваемость бетоно-

полистирольной смеси, микрокремнезем значительно увеличивает прочность соединения ППС с цементным камнем и позволяет полистиролбетону противостоять хлоридной коррозии [33], а полипропиленовые волокна снижают усадку бетона [34]. В связи с этим подбор компонентов полистиролбетона и их соотношений можно рассматривать как способ управления свойствами композита.

Несмотря на то что некоторые исследователи утверждают, что уровень токсичности ППС при сжигании не превышает уровень токсичности древесины, образуя аналогичные токсичные газы: окись углерода и двуокись углерода [37], невозможно полностью игнорировать невысокую огнестойкость полистиролбетона, имеющего класс горючести Г1 (трудногорючий) [8, 17]. Как известно, для изготовления жаропрочных, химически стойких материалов используются жидкие стекла [38–41], которые могут служить источником растворимого кремнезема [39]. Силикат кальция, образующийся в результате взаимодействия коллоидного кремнезема с цементным клинкером, делает структуру бетона более плотной [42].

Другим традиционным компонентом бетона, улучшающим его эксплуатационные характеристики, в том числе огнестойкость, является шамот [43]. Так, замена мелкого заполнителя — природного песка — на 5 % шамотом и на 5 % кварцевым порошком способна повысить прочность бетона на 25 % [44]. Шамот прекрасно сочетается с полистиролом. При исследовании химической стойкости образцов полистиролбетона, содержащих 30 % шамота, установлено, что после выдерживания в концентрированных растворах соляной и серной кислот прочность при сжатии бетонов, в состав которых входили 5 или 10 % ППС и 30 % шамота, в 2,3...2,5 раза превосходила прочность образцов, не содержащих ППС [45].

Использование жидкого стекла совместно с шамотным ломом способствует повышению термостойкости бетона [46]. В результате помола силикат-глыбы с шамотом и отвердителем можно получить вяжущее, обеспечивающее огнеупорные свойства бетона [47]. Приготовление полистиролбетона на жидком стекле с добавлением 6,25–6,95 % масс. тонкомолотого шамота

обеспечивает снижение деформирующей усадки при повышенной температуре (100–250 °С) [48].

Жидкое стекло обладает высокими адгезионными свойствами [49], повышает термостойкость, но масса на жидкостекольном вяжущем при твердении имеет значительную линейную усадку, для уменьшения которой необходимо применение специальных химических добавок или электроразогрева смеси [41, 43]. Добавление к традиционному вяжущему — портландцементу — жидкого стекла позволяет не только снизить усадку, повысить прочность при сжатии, но и увеличить термостойкость композита [50, 51].

Поскольку введение шамота в состав полистиролбетона оказывает влияние на прочность и плотность композита, невозможно использовать формулы для прогнозирования прочности полистиролбетона в зависимости от его плотности [8], рассчитанные на полистиролбетоны с маркой по плотности М200...М400. В данном случае для оптимизации состава полистиролбетона целесообразно применить метод планирования эксперимента.

Для определения оптимального состава полистиролбетона исследовали влияние количества пенополистирола (ППС), количества жидкого стекла и соотношения П/Ш (песок/шамот) на плотность полистиролбетона, на его прочность при сжатии и на термостойкость. Термостойкость оценивали по потерям массы и прочности после нагревания образцов. Кубики полистиролбетона размером 100×100×100 мм выдерживали в течение 1 ч в сушильном шкафу при температуре до 250 °С. После этого образцы вынимали и подвергали естественному охлаждению на воздухе (с помощью вентилятора), проводили визуальный осмотр образцов с целью выявления наружных дефектов. Затем определяли предел прочности образца при сжатии, процент потери прочности и массы после высокотемпературного нагрева.

Во всех замесах использовали мордовский портландцемент марки М500 Д0 (ГОСТ 30515–2013) — 2,38 кг, воду (ГОСТ 23732) — 0,98 л, суперпластификатор С-3 (ТУ 5870-006-58042865-05) — 0,021 кг на 10 л смеси. Остальные компоненты смеси: ППС (ГОСТ 28250–89), натриевое жидкое стекло (ГОСТ 13078), песок кварцевый из карьера «Хромцовский» Ивановской области

(ГОСТ 8736–2014) и шамот марки ЗША класс 4 по ГОСТ 23037, — были выбраны в качестве факторов математической модели. Интервалы варьирования факторов приведены в табл. 1.

В результате статистической обработки опытных данных были получены следующие регрессионные уравнения второго порядка:

Плотность бетона:

$$y_1 = 721,82 - 265,95x_1 + 51,49x_2 + 6,27x_3 + 9,013x_1x_2 - 55,39x_1x_3 - 27,76x_2x_3 + 194,66x_1^2 + 56,26x_2^2 + 89,76x_3^2. \quad (1)$$

Предел прочности при сжатии:

$$y_4 = 1,45 - 0,69x_1 + 0,135x_2 + 0,083x_3 - 0,99x_1x_2 - 0,19x_2x_3 + 0,37x_1^2 - 0,078x_3^2. \quad (2)$$

Потеря прочности:

$$y_2 = 37,04 - 4,573x_1 + 2,413x_3 - 2,14x_1x_3 - 5,14x_2x_3 - 2,17x_1^2 + 3,24x_3^2. \quad (3)$$

Потеря массы:

$$y_3 = 5,91 - 0,73x_1 - 1,89x_2 - 0,79x_3 - 1,11x_2x_3 + 1,117x_1^2 + 3,6x_2^2 + 2,99x_3^2. \quad (4)$$

Визуальный осмотр показал, что у всех образцов в результате термообработки появились трещины и выгорели гранулы ППС наружного слоя. В то же время потери прочности и массы значительно различались.

Отрицательные коэффициенты при x_1 в уравнениях (1)–(4) свидетельствуют об уменьшении количества всех рассматриваемых показателей с увеличением содержания ППС в составе композита. Оставшиеся два фактора оказывают на свойства бетона неоднозначное влияние.

С целью установления характера влияния факторов модели на изучаемые свойства композитов был проведен поиск экстремумов функций, описывающих эти свойства. Результаты представлены в табл. 2. Точка А представляет собой точку вблизи центра факторного простран-

ства, смещенную в сторону уменьшения содержания полистирола с 1,2075 до 0,839 л.

Следует отметить, что многие зарубежные ученые ориентируются на получение полистиролбетонов с плотностью до 1500...2000 кг/м³. Так, авторы [30, 31], экспериментируя с полистиролбетонами плотностью 970...1500 кг/м³, установили, что наибольшую прочность показали бетоны с плотностью 1000 кг/м³ [30] и 1100 кг/м³ [31]. По данным табл. 2 можно заключить, что уменьшение количества ППС в составе бетонной смеси повышает предел прочности образцов при сжатии, уменьшая при этом потерю прочности. Количество жидкого стекла не оказывает значительного влияния на прочность, но влияет на плотность и потерю массы, с повышением его выше 0,0535 кг потери массы возрастают значительно, поэтому увеличение содержания данного компонента в составе бетонной смеси свыше 0,0535 кг нецелесообразно. Содержание шамота благоприятно влияет на повышение прочности и снижение ее потери, однако в два раза повышает плотность композита.

Полученные уравнения позволяют предсказывать свойства полистиролбетона в зависимости от его состава.

Отметим, что плотность контрольного состава, не включающего ни шамот, ни жидкое стекло, составляет всего 590 кг/м³, но прочность его значительно ниже — 0,66 МПа. Потеря массы при нагревании контрольного состава меньше (2,75 %), однако происходит эта потеря, главным образом, за счет выгорания полистирола, а он легче шамота, поэтому сравнение по данному показателю предлагаемого состава с контрольным неоднозначно. Кроме того, при проведении испытаний контрольный состав нагревали до температуры 150 °С, а новые составы — до 250 °С.

Таким образом, полистиролбетон, содержащий огнеупорные добавки, отличается большей

Таблица 1

Интервалы варьирования факторов математической модели

Факторы	Обозначение в модели	Интервалы		
		–1	0	+1
ППС, л	x_1	0,525	1,2075	1,89
Жидкое стекло, кг	x_2	0,0357	0,0535	0,0714
Песок/шамот	x_3	0,075/0,225 = 0,3	1,65	0,225/0,075 = 3,0

Таблица 2

Сравнение свойств полистиролбетонов различных составов

Изучаемое свойство	Значение	Факторы (К — кодированное значение, Н — натуральное значение)					
		x_1		x_2		x_3	
		К	Н	К	Н	К	Н
Плотность, кг/м³							
Max	1404,82	–1	0,525	1	0,0714	1	3,0
Min	615,21	0,71		–0,49	0,0448	0,11	1,8
В центре факторного пространства	721,82	0	1,2075	0	0,0535	0	1,65
В точке А факторного пространства	929,75	–0,54	0,839	0,1	0,0553	0,06	1,73
Предел прочности при сжатии, МПа							
Max	2,93	–1	0,525	1	0,0714	1	3,0
Min	0,81	1	1,89	1	0,0714	–1	0,3
В центре факторного пространства	1,45	0	1,2075	0	0,0535	0	1,65
В точке А факторного пространства	1,95	–0,54	0,839	0,1	0,0553	0,06	1,73
Потеря прочности, %							
Max	48,51	0,56	1,59	–1	0,0357	1	3,0
Min	23,85	–1	0,525	–1	0,0357	–1	0,3
В центре факторного пространства	37,04	0	1,2075	0	0,0535	0	1,65
В точке А факторного пространства	34,13	–0,54	0,839	0,1	0,0553	0,06	1,73
Потеря массы, %							
Max	15,92	–1	0,525	–1	0,0357	–1	0,3
Min	5,43	0,33	1,433	0,29	0,0587	0,19	1,91
В центре факторного пространства	5,91	0	1,2075	0	0,0535	0	1,65
В точке А факторного пространства	6, 43	–0,54	0,839	0,1	0,0553	0,06	1,73

начальной прочностью при сжатии и способен выдерживать более высокую температуру. Наилучшими свойствами обладает полистиролбетон, в состав которого входят 0,8...1,2 л ППС, 0,05...0,06 кг жидкого стекла при соотношении песок/шамот 1,65...1,73. Полученный материал имеет лучшие эксплуатационные характеристики по сравнению с полистиролбетоном без огне-стойких добавок.

Полученные данные свидетельствуют о том, что сфера производства полистиролбетона не должна ограничиваться только сверхлегкими бетонами. Полистиролбетоны с плотностью 850...1200 кг/м³, полученные при частичной замене песка шамотом и с добавлением жидкого стекла, могут найти достойное применение в жилищном строительстве благодаря их способности выдерживать более высокую температуру.

Библиографический список

1. Путляев И. Е., Ярмаковский В. Н., Оринтликер Л. П. Состояние производства и перспективы развития легких бетонов на пористых заполнителях // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2001. № 9. С. 14–15.
2. Сулейманова Л. А. Высококачественные энергосберегающие и конкурентоспособные строительные материалы, изделия и конструкции // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2017. № 1. С. 9–16.
3. Соков В. Н. Создание теплоизоляционных материалов в электрогидротеплосиловом поле. М.: МГСУ, 2013. 316 с.
4. Kaya B. A., Kar F. Thermal and Mechanical Properties of Concretes with Styropor // Journal of Applied Mathematics and Physics. 2014. No 2. Pp. 310–315.
5. Prasetyo A., Kole S. N., Suryawanshi S. R. Study of use of polystyrene as a partial replacement for

fine aggregate in concrete // *International Journal of Engineering Science and Computing*. April 2017. Vol. 7, no 4. Pp. 10128–10130.

6. Носков А. С., Беляков В. А. Конструкции из полистиролбетона для строительства жилых зданий // *Жилищное строительство*. 2008. № 5. С. 24–25.

7. Есипова А. А., Комарова Н. Д. Полистиролбетон — оправданное решение для утепления // *Строительные материалы и изделия*. 2016. № 1 (47). С. 29–33.

8. Рахманов В. А. Инновационная технология полистиролбетона с оптимальными свойствами // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2011. № 9. С. 37–41.

9. Ибрагимов А. М., Титунин А. А., Гнедина Л. Ю., Лабутин А. Н. Полистиролбетон в промышленном и гражданском строительстве // *Строительные материалы*. 2016. № 10. С. 21–23.

10. Смесь для изготовления модифицированного полистиролбетона: пат. 2297402 Рос. Федерация / Рахманов В. А., Мелихов В. И., Козловский А. И., Амханицкий Г. Я., Росляк Ю. В., Довжик В. Г.; заявл. 09.04.04; опубл. 20.04.07.

11. Способ изготовления пенополистиролбетонных теплоизоляционных изделий: пат. 2278094 Рос. Федерация / Солдатова Н. И.; заявл. 11.02.04; опубл. 20.06.06.

12. Рахманов В. А., Казарин С. К., Мелихов В. И., Юнkevич А. В. Опыт производства энергоэффективных полистиролбетонных изделий системы «ЮНИКОН» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 2. С. 24–28.

13. Могушков Р. Т., Бойков И. В., Скориков Р. Е. Применение полистиролбетона в строительстве // сб. науч. тр. по итогам междунар. науч.-практ. конф. «Развитие технических наук в современном мире». № 2. Воронеж, 8 декабря 2015 г. С. 135–138.

14. Рахманов В. А. Теплоэффективные ограждающие конструкции зданий с использованием полистиролбетона, разработанных институтом «ВНИИжелезобетон» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 2. С. 9–18.

15. Perry S. H., Bischoff P. H., Yamura K. Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete // *Magazine of Concrete Research*. March 1991. Vol. 43, Issue 154. Pp. 71–76.

16. Trussoni M., Hays C. D., Zollo R. F. Fracture Properties of Concrete Containing Expanded Polystyrene Aggregate Replacement // *ACI Materials Journal*. Sep/Oct 2013. Vol. 110, Issue 5. Pp. 549–557.

17. Садович М. А. Пенополистиролцементные композиции в строительных материалах: Результаты исследований и внедрения в строительство. Братск: БрГТУ, 2000. 147 с.

18. Cook D. J. Expanded polystyrene concrete // R. N. Swamy (ed.). *Concrete technology and design*. Vol. 1: New concrete materials. London: Surrey Univ. Press, 1983. Pp. 41–69.

19. Herki B. A., Khatib J. M., Negim E. M. Lightweight Concrete Made from Waste Polystyrene and Fly Ash // *World Applied Sciences Journal*. 2013. No 21 (9). Pp. 1356–1360.

20. Довжик В. Г. Факторы, влияющие на прочность и плотность полистиролбетона // *Бетон и железобетон*. 2004. № 3. С. 5–11.

21. Herki B. Absorption Characteristics of Lightweight Concrete Containing Densified Polystyrene // *Civil Engineering Journal*. 2017. Vol. 3, Issue 8. Pp. 594–609.

22. Sayadi A. A., Tapia J. U., Neitzert T. R., Clifton G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. Pp. 716–724.

23. Trussoni M. Fracture Properties of Concrete Containing Expanded Polystyrene Aggregate Replacement. Ph.D. Thesis, University of Miami, USA, 2009. Pp. 118–120.

24. Chen B., Liu J. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads // *Construction and Building Materials*. 2007. Vol. 21, no. 1. Pp. 7–11.

25. Miled K., Sab K., Le Roy R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modeling // *Mechanics of Materials*. 2007. Vol. 39, no. 3. Pp. 222–240.

26. Laukaitis A., Žurauskas R., Keriene J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties // *Cement and Concrete Composites*. 2005. Vol. 27, no. 1. Pp. 41–47.

27. Журба О. В., Шукина Е. Г., Архинчева Н. В., Заяханов М. Е., Шукин Е. А. Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон на основе регенерированного сырья // *Строительные материалы*. 2007. № 3. С. 50–52.

28. Ahmad, Mohd Hilton and Lee, Yee Loon and Mohd Noor, Nurazuwa and Adnan, Suraya Hani. Strength development of lightweight styrofoam concrete // *International Conference on Civil Engineering (ICCE08)*, 12–14 May 2008, Hyatt Regency Kuantan Resort, Kuantan, Pahang.

29. Babu D. S., Babu K. G., Wee T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35 (12). Pp. 1218–1223.

30. Kovács K. Polisztirol betonok tartóssága // *Durability of concrete structures — Proceedings*. Budapest, 2008. Pp. 257–278.

31. Muravljov M., Jevtić D., Zakić D. Properties of cement based composite made with expanded polystyrene grains and polypropylene fibers // Chemical industry. 2000. Vol. 54. HMIDA 8. Pp. 501–504.
32. Herki B. A., and Jamal M. Khatib Valorisation of waste expanded polystyrene in concrete using a novel recycling technique // European Journal of Environmental and Civil Engineering. 2016. Vol. 1, no. 11. Pp. 1–19.
33. Babu K. G., Babu D. S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume // Cement and Concrete Research. 2003. Vol. 33. Pp. 755–762.
34. Chen B., Liu J., Chen L. Experimental Study of Lightweight Expanded Polystyrene Aggregate Concrete Containing Silica Fume and Polypropylene Fibers // J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.). 2010. No. 15 (2). Pp. 129–137.
35. Light-weight cementitious product filing: United States of America Patent No 4504320; Priority Data 26.09.83. Grant Date 12.03.85.
36. Chen B., Liu J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber // Cement and Concrete Research. 2004. Vol. 34, no. 7. Pp. 1259–1263.
37. Ravindrarajah R. S., Tuck A. J. Lightweight concrete with expanded polystyrene beads // Civil Engineering Monograph (Sydney). March 1993. No. 93/1.
38. Method for making thermal insulating, fire resistant material: Pat. US No 4235836; Priority Data 31.01.78 [GB]; Grant Date 19.01.79.
39. Фиговский О. Л., Кудрявцев П. Г. Жидкое стекло и водные растворы силикатов как перспективная основа технологических процессов получения новых нанокomпозиционных материалов // Инженерный вестник Дона. 2014. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2014/2448> (дата обращения: 20.03.2018).
40. Хлыстов А. И., Горюшинский И. В., Власов А. В. Жаростойкие бетоны на жидком стекле повышенной долговечности // Огнеупоры и техническая керамика. 2013. № 4–5. С. 22–27.
41. Орлова А. М., Григорьева Л. С., Логунин А. Ю., Белов Н. Р. Особенности структуры стеклополистиролбетона на жидкостекольном вяжущем // Научное обозрение. 2015. № 18. С. 126–138.
42. Kasselouri V., Kouloumbi N., Thomopoulos T. Performance of silica fume-calcium hydroxide mixture as a repair material // Cement and Concrete Composites. 2001. Vol. 23, no. 1. Pp. 103–110.
43. Буров В. Ю., Соков В. В., Виноградов А. В. Теоретические основы создания безобжигового шамотного легковеса // Известия вузов. Строительство. 1998. № 1. С. 46–49.
44. Sadic Azeez, Remya Raju, Dr. P. R. Sreemahadevan. Pillay Partial Replacement of Fine Aggregate & Cement in Concrete with Ceramic Rejects // International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT). 2015. Vol. 28, no. 5. Pp. 243–247.
45. Saravanan V. P., Vijaya Sarathy R. Strength and Short Term Durability of Steel Waste and Polystyrene Based Concrete // International Journal of Engineering and Management Research. March-April 2016. Vol. 6, Issue 2. Pp. 323–326.
46. Жаростойкий бетон: пат. 2187482 Рос. Федерация / Жеско Ю. Е., Масленникова Л. Л., Сватовская Л. Б., Бабак Н. А., Зубер Д. Л., Семенникова И. В.; заявл. 18.10.00; опубл. 20.08.02.
47. Способ изготовления безобжиговых шамотных огнеупоров: пат. 2082699 Рос. Федерация / Тотурбиев Б. Д., Жуков В. В., Батырмурзаев Ш. Д., Хаджигалалов Г. Н.; заявл. 22.04.94; опубл. 27.06.97.
48. Формовочная смесь для изготовления теплоизоляционного материала: пат. 2341495 Рос. Федерация / Белых С. А., Соколова А. А., Трофимова О. В., Фадеева А. М.; заявл. 12.03.07; опубл. 20.12.08.
49. Корнеев В. И., Данилов В. В. Растворимое и жидкое стекло. СПб.: Стройиздат, 1996. 216 с.
50. Петров А. Н., Акулова М. В., Коростелев А. П. Методика приготовления полистиролбетонной смеси с жидким стеклом // Материалы XXII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза», 2016. Иваново: ИВГПУ. С. 71–74.
51. Акулова М. В., Степанова Е. А., Петров А. Н. Влияние добавки жидкого стекла на свойства бетона // Символ науки. 2016. № 11. С. 27–28.

References

1. Putlyaev I. E., Yarmakovskiy V. N., Orintlikher L. P. *Sostoyaniye proizvodstva i perspektivy razvitiya legkikh betonov na poristyykh zapolnitelyakh* [State of production and prospects for the development of lightweight concretes on porous aggregates]. *Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka – Building materials, equipment, technologies of the XXI century*, 2001, no. 9, pp. 14–15.
2. Suleymanova L. A. *Vysokokachestvennyye ehnergo-sberegayushchie i konkurentosposobnye stroitel'nye materialy, izdeliya i konstruksii* [High-quality energy-saving and competitive building materials, products and structures]. *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova – Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 2017, no 1, pp. 9–16.
3. Sokov V. N. *Sozdanie teploizolyatsionnykh materialov v ehlektrohidroteplosilovom pole* [Creation of heat-insulating materials in the electro-hydro-power field]. Moscow, MSBU Publ., 2013, 316 p.
4. Kaya B. A., Kar F. Thermal and Mechanical Properties of Concretes with Styropor. *Journal of Applied Mathematics and Physics*, 2014, no 2, pp. 310–315.

5. Prasetyo A., Kole S. N., Suryawanshi S. R. Study of use of polystyrene as a partial replacement for fine aggregate in concrete. *International Journal of Engineering Science and Computing*, April 2017, vol. 7, no. 4, pp. 10128–10130.
6. Noskov A. S., Belyakov V. A. *Konstruktsii iz polistirolbetona dlya stroitel'stva zhilykh zdaniy* [Structures made of polystyrene concrete for construction of residential buildings]. *Zhilishchnoye stroitel'stvo – Housing construction*, 2008, no. 5, pp. 24–25.
7. Esipova A. A., Komarova N. D. *Polistirolbeton – opravdannoe reshenie dlya utepleniya* [Polystyrene concrete as a justified solution for insulation]. *Stroitelnyye materialy i izdeliya – Building materials and products*, 2016, no. 1(47), pp. 29–33.
8. Rakhmanov V. A. *Innovatsionnaya tekhnologiya polistirolbetona s optimal'nymi svoystvami* [Innovative technology of polystyrene concrete with optimal properties]. *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye i tekhnologii XXI veka – Building materials, equipment, technologies of the XXI century*, 2011, no. 9, pp. 37–41.
9. Ibragimov A. M., Titunin A. A., Gnedina L. Yu., Labutin A. N. *Polistirolbeton v promyshlennom i grazhdanskom stroitel'stve* [Polystyrene concrete in industrial and civil construction]. *Stroitelnyye materialy – Building materials*, 2016, no. 10, pp. 21–23.
10. Rakhmanov V. A., et al. *Smes' dlya izgotovleniya modifitsirovannogo polistirolbetona* [Mixture for the manufacture of modified polystyrene concrete]. Patent RF, no. 2297402, 2007.
11. *Sposob izgotovleniya penopolistirolnykh teploizolyatsionnykh izdeliy* [Method of manufacturing expanded polystyrene concrete insulation products]. Patent RF no 2278094; 2006.
12. Rakhmanov V. A., Kazarin S. K., Melikhov V. I., Yunkevich A. V. *Opyt proizvodstva energoeffektivnykh polistirolbetonnykh izdeliy sistemy «YUNIKON»* [Experience in the production of energy-efficient polystyrene concrete products of the UNICON system]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2017, no. 2, pp. 24–28.
13. Mogushkov R. T., Boykov I. V. *Primeneniye polistirolbetona v stroitel'stve* [Application of polystyrene concrete in construction]. *Trudy mezhdunar. nauch.-praktich. konf. «Razvitiye tekhnicheskikh nauk v sovremennom mire»* [Proc. of the Int. Sci. and Practical Conf. “Development of Technical Sciences in the Modern World”]. Voronezh, 2015, no. 2, pp. 135–138.
14. Rakhmanov V. A. *Teploeffektivnyye ograzhdayushchiye konstruktsii zdaniy s ispolzovaniyem polistirolbetona, razrabotannykh institutom «VNIIZHELEZOBETON»* [Heat-efficient enclosing structures of buildings using polystyrene concrete, developed by the Institute «VNIIZHELEZOBETON»]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo – Industrial and civil construction*, 2017, no. 2, pp. 9–18.
15. Perry S. H., Bischoff P. H., Yamura K. Mix details and material behaviour of polystyrene aggregate concrete. *Magazine of Concrete Research*, March 1991, vol. 43, no. 154, pp. 71–76.
16. Trussoni M., Hays C. D., Zollo R. F. Fracture Properties of Concrete Containing Expanded Polystyrene Aggregate Replacement. *ACI Materials Journal*, Sep/Oct 2013, vol. 110, no. 5, pp. 549–557.
17. Sadovich M. A. *Penopolistiroltsementnyye kompozitsii v stroitelnykh materialakh: Rezultaty issledovaniy i vnedreniya v stroitel'stvo* [Expanded polystyrene cement compositions in building materials. Results of research and implementation in construction]. Bratsk, BrSTU Publ, 2000, 147 p.
18. Cook D. J. *Expanded polystyrene concrete*. In: Swamy editor. *New concrete materials. Concrete technology and design*, vol. 1. London: Surrey press, 1983, pp. 41–69.
19. Herki B. A., Khatib J. M., Negim E. M. Lightweight Concrete Made from Waste Polystyrene and Fly Ash. *World Applied Sciences Journal*, 2013, no. 21 (9), pp. 1356–1360.
20. Dovzhik V. G. *Fakty, vliyayushchiye na prochnost i plotnost polistirolbetona* [Factors affecting the strength and density of polystyrene concrete]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and Reinforced Concrete*, 2004, no. 3 pp. 5–11.
21. Herki B. Absorption Characteristics of Lightweight Concrete Containing Densified Polystyrene. *Civil Engineering Journal*, 2017, vol. 3, no. 8, pp. 594–609.
22. Sayadi Ali A., Tapia J. U., Neitzert T. R., Clifton G. C. Effects of expanded polystyrene (EPS) particles on fire resistance, thermal conductivity and compressive strength of foamed concrete. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 112, pp. 716–724.
23. Trussoni M. Fracture Properties of Concrete Containing Expanded Polystyrene Aggregate Replacement. Ph.D. Thesis, University of Maimi, Coral Gables, FL, USA, 2009. pp. 118–120.
24. Chen B. and Liu J. Mechanical properties of polymer-modified concretes containing expanded polystyrene beads. *Construction and Building Materials*, 2007, vol. 21, no. 1, pp. 7–11.
25. Miled K., Sab K., Le Roy R. Particle size effect on EPS lightweight concrete compressive strength: experimental investigation and modeling. *Mechanics of Materials*, 2007, vol. 39, no. 3, pp. 222–240.
26. Laukaitis A., Žurauskas R., Keriene J. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties. *Cement and Concrete Composites*, 2005, vol. 27, no. 1, pp. 41–47.
27. Zhurba O. V., et al. *Konstruktsionno-teploizolyatsionnyy polistirolbeton na osnove regenerirovannogo syr'ya* [Structural and heat-insulating polystyrene concrete

on the basis of regenerated raw materials]. *Stroitelnyye materialy – Construction Materials*, 2007, no 3, pp. 50–52.

28. Ahmad Mohd Hilton et al. *Strength development of lightweight styrofoam concrete*. *International Conference on Civil Engineering (ICCE08)*, 12–14 May 2008, Hyatt Regency Kuantan Resort, Kuantan, Pahang.

29. Babu D. S., Babu K. G., Wee T. H. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 2005, vol. 35 (12), pp. 1218–1223.

30. Kovács K. Polisztirol betonok tartóssága. *Durability of concrete structures – Proceedings*. Budapest, 2008, pp. 257–278.

31. Muravljov M., Jevtić D., Zakić D. Properties of cement based composite made with expanded polystyrene grains and polypropylene fibers. *Chemical industry*, 2000, vol. 54, HMIDA 8, pp. 501–504.

32. Herki B. A., Jamal M. Khatib. Valorisation of waste expanded polystyrene in concrete using a novel recycling technique. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2016, vol. 1, no. 11, pp. 1–19.

33. Babu K. G., Babu D. S. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume. *Cement and Concrete Research*, 2003, vol. 33, pp. 755–762.

34. Chen B., Liu J., Chen L. Experimental Study of Lightweight Expanded Polystyrene Aggregate Concrete Containing Silica Fume and Polypropylene Fibers. *J. Shanghai Jiaotong Univ. (Sci.)*, 2010, no. 15 (2), pp. 129–137.

35. *Light-weight cementitious product filing*. United States of America Patent no 4504320; Priority Data 26.09.83. Grant Date 12.03.85.

36. Chen B., Liu J. Properties of lightweight expanded polystyrene concrete reinforced with steel fiber. *Cement and Concrete Research*, 2004, vol. 34, no. 7, pp. 1259–1263.

37. Ravindrarajah R. S., Tuck A. J. Lightweight concrete with expanded polystyrene beads. *Civil Engineering Monograph (Sydney)*, March 1993, no. 93/1.

38. *Method for making thermal insulating, fire resistant material*. Patent US No 4235836; Priority Data 31.01.78 [GB]; Grant Date 19.01.79.

39. Figovskiy O. L., Kudryavtsev P. G. *Zhidkoye steklo i vodnyye rastvory silikatov, kak perspektivnaya osnova tekhnologicheskikh protsessov polucheniya nanokompozitnykh materialov* [Liquid glass and aqueous solutions of silicates, as a promising base of technological processes for the production of new nano-composite materials]. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal «Inzhenernyy Vestnik Dona» – Electronic scientific journal «Engineering Bulletin of the Don»*, 2014, no. 2, Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2014/2448> (accessed: 20.03.2018).

40. Khlystov A. I., Goryushinskiy I. V., Vlasov A. V. *Zharostoykiye betony na zhidkom stekle povyshennoy*

dogovechnosti [Heat-resistant concrete on liquid glass with increased durability]. *Ogneupory i tekhnicheskaya keramika – Refractories and technical ceramics*, 2013, no. 4-5, pp. 22–27.

41. Orlova A. M., Grigoryeva L. S., Logunin A. Yu., Belov N. R. *Osobennosti struktury steklopolistirobetona na zhidkostekolnom vyazhushchem* [Features of the structure of glass polystyrene concrete on a liquid-glass binder]. *Nauchnoye obozreniye – Scientific Review*, 2015, no. 18, pp. 126–138.

42. Kasselouri V., Kouloumbi N., Thomopoulos T. Y. Performance of silica fume-calcium hydroxide mixture as a repair material. *Cement and Concrete Composites*, 2001, vol. 23, no. 1, pp. 103–110.

43. Burov V. Yu., Sokov V. V., Vinogradov A. V. *Teoreticheskiye osnovy sozdaniya bezobzhigovogo shamotnogo legkovesa* [Theoretical foundations for the creation of unburned chamotte lightweight]. *Izvestiya vuzov. Stroitelstvo – Proceedings of high schools. Building*, 1998, no. 1, pp. 46–49.

44. Sadic Azeez, Remya Raju, Dr. P. R. Sreemahadevan. Pillay Partial Replacement of Fine Aggregate & Cement in Concrete with Ceramic Rejects. *International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)*, 2015, vol. 28, no. 5, pp. 243–247.

45. Saravanan V. P., Vijaya Sarathy R. Strength and Short Term Durability of Steel Waste and Polystyrene Based Concrete. *International Journal of Engineering and Management Research*, March-April 2016, vol. 6, no. 2, pp. 323–326.

46. Zhesko Yu. E., et al. *Zharostoykiy beton* [Heat-resistant concrete]. Patent RF, no 2187482, 2002.

47. *Sposob izgotovleniya bezobzhigovykh shamotnykh ogneuporov* [Method for manufacturing non-flaming chamotte refractories]. Patent RF, no 2082699, 1997.

48. *Formovochnaya smes dlya izgotovleniya teploizolyatsionnogo materiala* [Molding mixture for manufacturing heat-insulating material]. Patent RF, no. 2341495, 2008.

49. Korneev V. I., Danilov V. V. *Rastvorimoye i zhidkoye steklo* [Soluble and liquid glass], St. Petersburg, Stroyizdat Publ., 1998, 216 p.

50. Petrov A. N., Akulova M. V., Korostelyev A. P. *Metodika prigotovleniya polistirobetonnoy smesi s zhidkim steklom* [Method for preparation of polystyrene concrete mixture with liquid glass]. *Materialy XXII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Informatsionnaya sreda vuza»* [Proc. of the XXII Int. Sci. and Techn. Conf. «Information Environment of the University»]. Ivanovo, IVSPU Publ., 2016, pp. 71–73.

51. Akulova M. V., Stepanova Ye. A., Petrov A. N. *Vliyaniye dobavki zhidkogo stekla na svoystva betona* [Effect of the addition of liquid glass on the properties of concrete]. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal. «Simvol nauki» – International Sci. Jour. «Symbol of Science»*, 2016, no. 11, pp. 27–28.