

УДК 691.327.32

**Г.В. Сопегин**

**G.V. Sopegin**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Perm National Research Polytechnic University

## **ПОДБОР СОСТАВА И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛЕГКОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО ПЕНОСТЕКЛА**

### **SELECTION OF COMPOSITION AND RESEARCH OF PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT CONCRETE BASED ON GRANULATED FOAM GLASS**

Представлены результаты исследований физико-механических и теплотехнических свойств легких бетонов на основе гранулированного пеностекла. Отмечены особенности подбора состава бетона и приготовления бетонной смеси. Произведена оценка влияния различного соотношения сырьевых компонентов на формирование прочностных и теплозащитных свойств легкого бетона. В результате исследований была доказана возможность получения легких конструкционно-теплоизоляционных бетонов на основе гранулированного пеностекла, имеющих марку по плотности D500–D1500 и класс по прочности B2,5–B5.

**Ключевые слова:** водоцементное отношение, гранулированное пеностекло, легкие бетоны, средняя плотность, пористые заполнители, прочность при сжатии, теплопроводность.

This paper presented the research results of physical, mechanical and thermal properties of lightweight concrete based on granulated foam glass. The features of selection of concrete composition and preparation of concrete mixture are noted. The influence of different ratio of raw materials on the strength and heat-protective properties of lightweight concrete was evaluated. As a result of researches, the possibility to obtain light structural and heat-insulating concretes based on granulated foam glass. Such concretes have a density class D500-D1500 and grade class B2,5-B5.

**Keywords:** water-cement ratio, granulated foam glass, lightweight concretes, average density, porous fillers, compressive strength, thermal conductivity.

Одним из главных критериев при оценке эффективности конструкционно-теплоизоляционных строительных материалов является их способность обеспечивать необходимые требования по физико-механическим и теплотехническим свойствам. Такие материалы должны обладать высоким тепловым сопротивлением, не быть токсичными и горючими, а также обеспечивать достаточную механическую прочность и стойкость к воздействию агрессивных сред. Анализ рынка и литературных данных показал, что по комплексу свойств наиболее эффективными при строительстве зданий и сооружений являются легкие бетоны на пористых заполнителях [1–5].

На сегодняшний день большое количество исследований направлено на изучение пористых заполнителей, имеющих сплошную оболочку с закрытой пористостью, твердая фаза которых более чем на 90 % находится в аморфном стекловидном состоянии [4–7]. Одним из таких заполнителей является гранулированное пеностекло (ГПС), представляющее собой высокопористый материал на основе силикатных стекол, способных при нагревании размягчаться и при наличии газообразователя формировать ячеистую структуру [6, 8, 9]. Наибольший интерес представляет использование ГПС в качестве заполнителя для получения эффективных легких конструкционно-теплоизоляционных бетонов с улучшенными деформативно-прочностными и теплозащитными характеристиками.

Как известно [1, 2], легкие бетоны обладают комплексом свойств, приобретаемых за счет использования в их составе пористых заполнителей. В свою очередь свойства ГПС формируются в зависимости от вида используемых при их производстве газообразователей и добавок [6–10]. На одном из предприятий Пермского края была получена опытная партия ГПС, в котором в качестве газообразователя применялась сажа, а в качестве связующей добавки – жидкое стекло.

Цель работы заключалась в исследовании возможности применения данного вида заполнителя в легких бетонах.

В ходе выполнения работы решались следующие задачи:

- ♦ изучение особенностей подбора состава бетонной смеси для легкого бетона с использованием гранулированного пеностекла;
- ♦ оценка наиболее эффективного соотношения компонентов для получения легкого бетона на основе гранулированного пеностекла;
- ♦ оценка показателей прочности, плотности и теплопроводности легкого бетона на основе гранулированного пеностекла (ГПС-бетон).

При проведении исследования по подбору состава и оценке качества ГПС-бетона использовались следующие материалы:

1) крупный заполнитель – гранулированное пеностекло фракционного состава 5–10 и 10–20 мм из опытной партии, полученной при проведении ползаводских испытаний. Характеристика гранулированного пеностекла представлена в табл. 1;

2) мелкий заполнитель – песок кварцево-полевошпатовый Заостровского карьера, г. Пермь, насыпная плотность 1485 кг/м<sup>3</sup>, модуль крупности  $M_k = 1,96$ ;

3) портландцемент ЦЕМ II/A-III 32,5 Б (марка по прочности М400) производства ОАО «Горнозаводскцемент», соответствующий требованиям ГОСТ 31108–2003;

4) вода по ГОСТ 23732–2011.

Таблица 1

## Физико-механические свойства гранулированного пеностекла

Гранулированное пеностекло	Насыпная плотность (марка), кг/м <sup>3</sup>	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Водопоглощение, %	Прочность при сдавливании в цилиндре (марка), МПа
Фр. 5–10 мм	230 (M250)	404	18	0,67 (П35)
Фр. 10–20 мм	195 (M200)	343	21	0,5 (П20)

*Примечание.* Марки материала по насыпной плотности и прочности установлены согласно ГОСТ 32496–2013 «Заполнители пористые для легких бетонов. Технические условия».

Подбор состава бетона осуществлялся в соответствии с ГОСТ 27006–86 с учетом рекомендаций, предложенных в научных источниках [4, 11].

Согласно [4] приготовление бетонной смеси с использованием ГПС следует проводить в два этапа. На первом этапе необходимо получить сухую смесь цемента и песка, а ГПС смешать с 2/3 количества воды затворения, с последующей выдержкой полученной смеси в течение 5 мин.

На втором этапе необходимо сухую цементно-песчаную смесь ввести в подготовленный состав ГПС и воды, перемешать, после чего добавить оставшуюся часть расчетного количества воды.

Подвижность бетонной смеси определялась по осадке стандартного конуса согласно методике, представленной в ГОСТ 10181–2014.

Способ уплотнения бетонной смеси с использованием ГПС при формировании выбирался исходя из результатов ранее выполненных предварительных испытаний. Известно, что при уплотнении бетонных смесей на основе пористых заполнителей с использованием только вибрационного воздействия заполнитель всплывает, а цементно-песчаный раствор при этом оседает на дно формы, вследствие чего происходит расслоение смеси [1, 2, 4, 11]. Во избежание подобного отрицательного эффекта при формировании образцов-кубов ГПС-бетона в данной работе использовалось виброуплотнение с пригрузом.

Образцы в формах хранились 3 сут на воздухе под влажным покрытием, исключая испарение из них влаги. В возрасте 3 сут образцы были расплавлены и затем хранились при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и относительной влажности воздуха  $(95 \pm 2)$  %.

Испытание образцов-кубов ГПС-бетона проводилось по ГОСТ 12730.1–78 и ГОСТ 10180–2012. Коэффициент теплопроводности ГПС-бетона был определен при стационарном тепловом режиме по ГОСТ 7076–99.

Образцы-кубы ГПС-бетона размером 100×100×100 мм испытывались в возрасте 14 сут. Величина прочности при сжатии в возрасте 28 сут рассчитывалась по формуле

$$R_{28} = R_{14} \frac{\lg 28}{\lg 14}. \quad (1)$$

где  $R_{28}$  – предел прочности ГПС-бетона в возрасте 28 сут, МПа;  $R_{14}$  – предел прочности ГПС-бетона в возрасте 14 сут, МПа.

Подбор состава конструкционно-теплоизоляционного ГПС-бетона марки по плотности от D500 до D1500 проводился расчетно-экспериментальным методом. Как известно, бетоны представляют собой трехфазную систему, включающую в себя цементный камень, заполнитель и переходную межфазную зону в системе «заполнитель – цементный камень» [12]. Для достижения высоких показателей качества конструкционно-теплоизоляционного бетона необходимо сформировать переходную межфазную зону, прочность которой во многом определяется качеством сцепления заполнителя с цементным камнем. На прочность сцепления в данной системе оказывает значительное влияние геометрия поверхности заполнителя и подвижность цементного теста [4]. Ранее выявлено (табл. 1), что физико-механические характеристики ГПС, в том числе величина водопоглощения, определяются его фракционным составом. Следовательно, при подборе состава ГПС-бетона необходимо учитывать не только свойства самого заполнителя, но и величину принимаемого водоцементного отношения.

Из анализа литературных данных [4, 11] следует, что при использовании в легких бетонах стекловидных пористых заполнителей расход цемента для марок бетона по плотности D500–D1500 составляет 280–300 кг/м<sup>3</sup>. В таком случае оптимальное водоцементное отношение может составлять величину, близкую к 0,6 – от 0,57 до 0,63. При дальнейшем повышении водоцементного отношения в легких бетонах наблюдается выраженная сегрегация композита, которая приводит к неравномерности его свойств по объему материала [13].

Другой важной характеристикой при подборе состава ГПС-бетона является соотношение мелкой (5–10 мм) и крупной (10–20 мм) фракций заполнителя. В работе [11] показано, что при различных соотношениях крупной и мелкой фракции ГПС и в зависимости от величины водоцементного отношения содержание цементного теста в бетонной смеси может составлять от 14 до 25 %. При этом уменьшение содержания крупной фракции заполнителя влечет за собой повышение объемного содержания цементного теста.

В связи с отмеченными особенностями состава бетонной смеси необходимо было определить степень влияния количества мелкого заполнителя – кварцево-полевошпатового песка – на свойства и структуру ГПС-бетона. При подборе состава ГПС-бетона содержание песка (П) и ГПС было принято в следующих соотношениях (П/ГПС): 60/40, 40/60 и 80/20. Однако в ходе приготовления бетонной смеси было выявлено, что при В/Ц = 0,6 и отноше-

нии П/ГПС = 80/20 бетонная смесь расслаивается. Для предотвращения расслаивания бетонной смеси величина водоцементного отношения была снижена до 0,46. Далее для каждого состава определялась подвижность бетонной смеси по величине осадки стандартного конуса (ОК).

Составы ГПС-бетона и характеристика удобоукладываемости бетонной смеси представлены в табл. 2.

Таблица 2

Составы ГПС-бетона и характеристика удобоукладываемости бетонной смеси

Номер состава	В/Ц	П/ГПС	Расход компонентов на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси					ОК, см
			Вода, л	Цемент, кг	Песок, кг	ГПС, кг		
						Фр. 5–10 мм	Фр. 10–20 мм	
1	0,6	60/40	172	286	195	78	52	5
2	0,6	40/60	172	286	130	117	78	3
3	0,46	80/20	132	286	260	39	26	1

Как видно из табл. 2, при равной величине водоцементного отношения (В/Ц = 0,6) и при содержании песка, равном 40 % (состав № 2), подвижность смеси снижается на 2 см по сравнению с величиной подвижности смеси, где содержание песка составляет 60 % (состав № 1). Уменьшение подвижности смеси при большем содержании ГПС, в частности фр. 5–10 мм, обусловлено его значительным поглощением воды из бетонной смеси, что приводит к изменению свойств как самой бетонной смеси, так и впоследствии к изменению свойств ГПС-бетона.

Результаты определения физико-механических и теплотехнических свойств ГПС-бетона представлены в табл. 3.

Таблица 3

Физико-механические и теплотехнические свойства ГПС-бетона

Показатели	Состав образцов-кубов ГПС-бетона		
	Состав № 1	Состав № 2	Состав № 3
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	1320	528	1480
Предел прочности при сжатии в возрасте 14 сут, МПа	5,43	2,17	7,66
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	6,84	3,74	9,66
Теплопроводность, Вт/м·К	0,282	0,253	0,429
Термическое сопротивление, м <sup>2</sup> ·К/Вт	0,049	0,055	0,031
Класс по прочности	B5	B2,5	B5
Марка по плотности	D1300	D500	D1500

Как следует из данных табл. 3, физико-механические и теплотехнические свойства ГПС-бетона зависят от содержания в его составе мелкого и крупного

заполнителя. Так, при одинаковой величине водоцементного отношения, равной 0,6, прочность при сжатии ГПС-бетона состава № 1 (П/ГПС = 60/40) более чем в 2 раза выше, чем для ГПС-бетона состава № 2 (П/ГПС = 40/60). При этом плотность ГПС-бетона состава № 1 также возрастает в 2 раза по сравнению с составом № 2.

Результаты теплотехнических испытаний показывают, что наименьшая теплопроводность достигается при В/Ц = 0,6 и П/ГПС = 40/60 (состав № 2). При этом прочность ГПС-бетона данного состава является минимальной и составляет 3,74 МПа. Составы № 1 и № 3 обеспечивают одинаковый класс по прочности В5. Однако плотность и теплопроводность у состава № 1 ниже на 10,8 и 34,3 % соответственно.

Теплопроводность составов № 1 и № 2 отличается незначительно, при этом показатели прочности и плотности у состава № 1 значительно превосходят те же показатели у состава № 2. Причина данного расхождения в показателях прочности и плотности заключается в том, что значительное количество ГПС фр. 5–10 мм в составе № 2 приводит к повышенному поглощению воды и цементно-песчаного раствора из бетонной смеси. Это способствует повышению жесткости смеси, приводящему к увеличению прочности и плотности ГПС-бетона.

Теплопроводность же легкого бетона обуславливается количеством газовой фазы в порах заполнителя. Следовательно, с уменьшением содержания ГПС в структуре бетона снижается и количество газовой фазы, что в целом приводит к увеличению теплопроводности при минимальной величине термического сопротивления.

Кроме того, в результате физико-механических испытаний было выявлено, что максимальная прочность ГПС-бетона наблюдается у состава № 3, отличающегося наибольшим содержанием плотного песка (80 %) и минимальной величиной водоцементного отношения (0,46), что обуславливает меньшее количество пор и пустот в затвердевшем бетоне. Этот фактор, в свою очередь, способствует повышению плотности и прочности композита.

На рисунке приведен вид поверхности скола образцов ГПС-бетона разработанных составов после испытания на прочность при сжатии.

Как видно из рисунка, разрушение ГПС-бетона проходит по гранулам заполнителя, которые являются наиболее слабыми участками композита. Прочность связи заполнителя с цементным камнем подтверждается отсутствием цельных гранул пеностекла на поверхности скола образцов при данных параметрах разработанных составов, что соответствует результатам, полученным другими авторами [5, 11, 13].

Исходя из проведенного анализа можно заключить, что наиболее эффективным с точки зрения обеспечения необходимых физико-механических и теплотехнических свойств является состав № 1, обеспечивающий марку по плотности D1300 и класс по прочности В5.

*a**б**в*

Рис. Вид поверхности скола образцов ГПС-бетона:

*a* – состав № 1; *б* – состав № 2; *в* – состав № 3

Согласно ГОСТ 25820–2014 полученные легкие бетоны можно использовать в качестве стеновых ограждающих конструкций и покрытий в зданиях и сооружениях различного назначения.

Таким образом, анализ результатов проведенных исследований и литературных данных позволяет сделать следующие выводы:

1. На основе гранулированного пеностекла, использованного в данном исследовании, возможно получить легкие конструкционно-теплоизоляционные бетоны с маркой по плотности от D500 до D1500 и классом по прочности B2,5–B5. Такие бетоны могут применяться для возведения стеновых ограждающих конструкций и покрытий в зданиях и сооружениях различного назначения.

2. При подборе состава ГПС-бетона необходимо учитывать водоцементное отношение и физико-механические свойства гранулированного пеностекла.

3. Наиболее эффективное соотношение компонентов, обеспечивающих необходимые прочностные и теплотехнические характеристики ГПС-бетона, соответствует составу № 1. Такой состав позволяет получить ГПС-бетон с маркой по плотности D1300, классом по прочности B5 и теплопроводностью 0,282 Вт/м·К.

### Список литературы

1. Смолий В.А., Косарев А.С., Яценко Е.А. Разработка технологии легких бетонов с пористым золошлаковым заполнителем // Научный альманах. – 2016. – № 11–2 (25). – С. 233–236.

2. Иванов И.А. Легкие бетоны на искусственных пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1993. – 182 с.

3. Бруссер М.И. Заполнители для бетона: современные требования к качеству // Строительные материалы. – 2004. – № 10. – С. 62–63.

4. 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.

5. Попов М.Ю., Закревская Л.В., Ваганов В.Е. Новые легкие теплоизоляционные бетоны на основе пеностекла // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. тр. – Днепропетровск: ПГАСА, 2012. – № 64. – С. 366–370.

6. Сопегин Г.В., Семейных Н.С. Подготовка исходных компонентов шихты в производстве гранулированного пеностекла // Master`s Journal. – 2016. – № 2. – С. 44–54.

7. Пузанов С.И. Особенности использования материалов на основе стеклобоя как заполнителей портландцементного бетона // Строительные материалы. – 2007. – № 7. – С. 12–15.

8. Кетов А.А., Пузанов И.С., Саулин Д.В. Опыт производства пеностеклянных материалов из стеклобоя // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 70–72.

9. Семейных Н.С., Сопегин Г.В. Анализ использования различных сырьевых компонентов в производстве гранулированного пеностекла // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 60–74.

10. Вайсман Я.И., Кетов А.А., Кетов П.А. Научные и технологические аспекты производства пеностекла // Физика и химия стекла. – 2015. – Т. 41, № 2. – С. 214–221.

11. Попов М.Ю. Подбор состава легких бетонов на реакционноспособных пористых заполнителях // Научное обозрение. – 2015. – № 16. – С. 162–167.

12. Баженов Ю.М. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2003. – 500 с.

13. Легкие бетоны на основе пеностекла, модифицированные наноструктурами [Электронный ресурс] / 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](http://nanobuild.ru/ru_RU/journal/Nanobuild_6_2012_RUS.pdf). (дата обращения: 15.03.2018).

Получено 29.03.2018

**Сопегин Георгий Владимирович** – магистрант, строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [sp.georg@yahoo.com](mailto:sp.georg@yahoo.com).

Научный руководитель – **Семейных Наталья Сергеевна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительный инжиниринг и материаловедение», строительный факультет, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, e-mail: [semeyn@mail.ru](mailto:semeyn@mail.ru).