

## Подбор состава конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе гранулированного пеностекла с применением аппарата математического планирования эксперимента

*Г.В. Сопегин, Н.С. Семейных*

*Пермский национальный исследовательский политехнический университет  
(ПНИПУ)*

**Аннотация:** Рассмотрены факторы, которые необходимо учитывать при подборе состава легкого бетона с использованием гранулированного пеностекла (ГПС), а также показано влияние состава бетонной смеси на физико-механические и теплотехнические свойства полученного материала. Представленные математические модели позволили установить функциональную связь между технологическими факторами варьирования (содержание ГПС и водоцементное отношение) и выходными параметрами оптимизации (средняя плотность и прочность при сжатии).

**Ключевые слова:** водоцементное отношение, гранулированное пеностекло, легкий бетон, математическое планирование эксперимента, поверхность отклика, прочность при сжатии, средняя плотность, уравнение регрессии.

В современном строительстве актуальной остается проблема обеспечения необходимых требований по теплозащите строительных конструкций и создания новых энергосберегающих строительных материалов, обладающих также высокими прочностными характеристиками. Одним из перспективных и эффективных строительных материалов может стать легкий бетон на основе гранулированного пеностекла (ГПС-бетон) [1-7]. Согласно проведенным ранее исследованиям [2-4], ГПС-бетон по своим механическим и теплотехническим свойствам, а также долговечности отвечает требованиям, предъявляемым к конструкционно-теплоизоляционному бетону. В связи с отмеченными достоинствами ГПС-бетона необходимо развивать его производство, а за счет регулирования состава бетонной смеси получать материал с широким диапазоном физико-механических и теплотехнических свойств.

Основной задачей при подборе состава ГПС-бетона стабильной и однородной структуры является определение и учет факторов, оказывающих влияние на его технические характеристики.

ГПС-бетонная смесь представляет собой трехфазную систему, где на прочность сцепления цемента с заполнителем значительное влияние оказывает геометрия и характер поверхности ГПС и подвижность цементного теста [1]. Таким образом, рассчитывая и подбирая состав ГПС-бетона, необходимо учитывать такие факторы, как свойства заполнителя и величину принимаемого водоцементного отношения.

В работах [3, 4] отмечено, что для повышения прочностных характеристик ГПС-бетона необходимо использовать смесь мелкой (5-10 мм) и крупной (10-20 мм) фракций ГПС в соотношении 60/40.

Известно также, что значительное влияние на формирование структуры и свойств композита оказывает процентное соотношение мелкого и крупного заполнителя в составе бетонной смеси [8]. Поэтому данный показатель, наравне с водоцементным отношением, является необходимым фактором при подборе состава ГПС-бетона.

Цель работы заключалась в следующем:

- 1) исследовать влияние состава бетонной смеси на формирование физико-механических и теплотехнических свойств ГПС-бетона;
- 2) определить оптимальный состав конструкционно-теплоизоляционного ГПС-бетона с улучшенными показателями прочностных и теплозащитных характеристик.

При проведении исследования использовали портландцемент ЦЕМ II/A-Ш 32,5 Б по ГОСТ 31108-2016 (ПАО «Горнозаводскцемент»), песок кварцево-полевошпатовый Заостровского карьера (г. Пермь) по ГОСТ 8736-2014 ( $\rho_n = 1485 \text{ кг/м}^3$ ,  $M_k = 1,96$ ), гранулированное пеностекло фр. 5-10 и 10-20 мм (таблица 1), вода по ГОСТ 23732-2011.

---

Таблица 1

## Физико-механические свойства гранулированного пеностекла

Наименование показателя	Фракционный состав, мм	
	Фр. 5-10	Фр. 10-20
Марка по насыпной плотности (по ГОСТ 32496-2013)	M250	M200
Водопоглощение по массе, %	18	21
Пористость, %	82	85
Марка по прочности при сдавливании в цилиндре (по ГОСТ 32496-2013)	П35	П25

Приготовление опытных замесов осуществлялось по ГОСТ 27006-86. Однако, ввиду значительного водопоглощения ГПС, порядок смешивания компонентов был изменен, согласно методике, предложенной в [2]. Сначала ГПС предварительно смешивали с  $2/3$  количества воды затворения и выдерживали полученную массу в течение 5 мин. Далее подготовленный состав ГПС смешивали с сухой цементно-песчаной смесью, после чего добавляли оставшуюся часть расчетного количества воды.

В ходе эксперимента изготавливались образцы-кубы размером 100x100x100 мм. Образцы в течение 3 сут хранились в формах на воздухе под влажным покрытием. Далее образцы были распалублены и хранились при температуре  $(20 \pm 2)$  °С и относительной влажности воздуха  $(95 \pm 2)$  %.

Затем у образцов ГПС-бетона были определены величины средней плотности (ГОСТ 12730.1-78), прочности при сжатии (ГОСТ 10180-2012) и теплопроводности (ГОСТ 7076-99).

При подборе состава ГПС-бетона использовался метод, основанный на теории математического планирования эксперимента, который является достаточно перспективным и эффективным с точки зрения сокращения

количества проводимых опытов, позволяя при этом обеспечить высокую сходимость результатов [9, 10]. Определение оптимального состава ГПС-бетона осуществлялось, исходя из максимальной прочности при средней плотности, не превышающей  $1500 \text{ кг/м}^3$ .

В таблице 2 представлены параметры проведения эксперимента. Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний образцов приведены в таблице 3.

Таблица 2

Параметры проведения эксперимента

Факторы варьирования	Обозначение факторов	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни варьирования		
				-1	0	+1
Содержание ГПС (фр. 5-10 + фр. 10-20 мм)	$x_1$	%	20	20	40	60
В/Ц	$x_2$	–	0,1	0,4	0,5	0,6

Таблица 3

Матрица планирования эксперимента и результаты испытаний

№ опыта	Уровни переменных факторов				Результаты экспериментов			
	Кодированные		Натуральные		Средняя плотность (опытное значение), $\text{кг/м}^3$	Теоретическое значение средней плотности, $\text{кг/м}^3$	Прочность (опытное значение), МПа	Теоретическое значение прочности, МПа
1	-1	-1	20	0,4	1230	1241,14	10,93	10,98

2	+1	-1	60	0,4	1120	1128,25	4,52	4,4
3	-1	+1	20	0,6	1411	1422,21	7,14	7,45
4	+1	+1	60	0,6	528	543,05	3,74	3,82
5	0	0	40	0,5	1190	1198,11	7,08	7,47
6	+1	0	60	0,5	1040	1028,81	4,04	4,12
7	-1	0	20	0,5	1480	1472,36	9,66	9,23
8	0	+1	40	0,6	1321	1344,54	6,84	6,45
9	0	-1	40	0,4	992	998,24	6,53	6,24

В результате были получены уравнения регрессии 3-го порядка для средней плотности ( $y_p$ ) и прочности при сжатии ( $y_R$ ) образцов ГПС-бетона:

$$y_p = -146,59 + 0,1 \cdot x_1^3 - 8750 \cdot x_2^3 - 6,38 \cdot x_1^2 - 10,54 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 141,25 \cdot x_1 x_2^2 + 887,63 \cdot x_1 x_2 - 3157,5 \cdot x_2$$

$$y_R = 14,89 + 0,00023 \cdot x_1^3 - 65,5 \cdot x_2^3 - 0,013 \cdot x_1^2 - 0,029 \cdot x_1^2 \cdot x_2 + 1,79 \cdot x_1 x_2^2 + 0,93 \cdot x_1 x_2 - 11,79 \cdot x_2$$

Адекватность полученных математических моделей оценивалась с помощью критерия Фишера (F). Модель является адекватной, если расчетное значение критерия Фишера ( $F_p$ ) меньше табличного ( $F_T$ ). Данное условие выполняется в обоих случаях ( $F_p = 2,65 < F_T = 4,2$  – для средней плотности;  $F_p = 3,00 < F_T = 4,2$  – для прочности при сжатии), следовательно, полученная математическая модель является адекватной и ее можно описать графически (рис. 1).

При анализе данных рис. 1 установлено, что наибольшая прочность при сжатии (9,0-10,93 МПа) достигается при В/Ц 0,4-0,6 и содержании ГПС от 20 до 40 %, при этом средняя плотность ГПС-бетона не превышает 1500 кг/м<sup>3</sup>. Прочность при сжатии изменяется обратно пропорционально величине В/Ц. Данный факт объясняется тем, что при увеличении В/Ц повышается

пористость цементного камня, что ведет к снижению прочности композита [8].

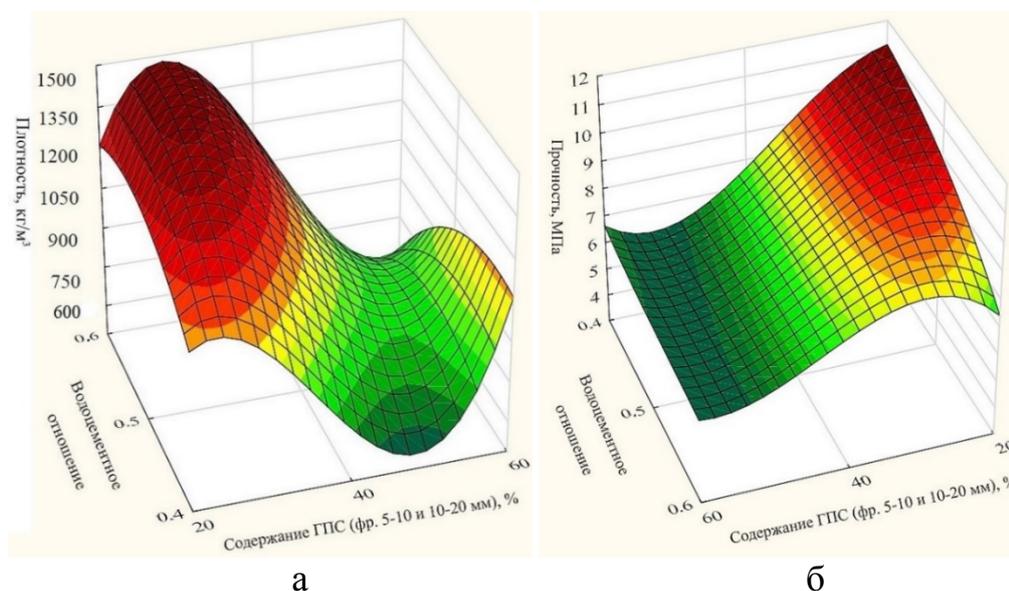


Рис. 1. Функции отклика средней плотности (а) и прочности при сжатии (б) ГПС-бетона от водоцементного отношения и содержания ГПС

Полученные составы ГПС-бетона были разделены на марки по средней плотности. Результаты определения теплопроводности образцов каждой марки приведены в таблице 4.

Таблица 4

Итоговые составы и свойства ГПС-бетона

В/Ц	Содержание ГПС в соотношении П/ГПС, %	Прочность при сжатии, МПа	Теплопроводность, Вт/м <sup>2</sup> К	Марка по плотности
0,4	20	10,93	0,272	D1300
	40	6,53	0,254	D1000
	60	4,52	0,263	D1200
0,5	20	9,66	0,375	D1500
	40	7,08	0,267	D1200
	60	4,04	0,258	D1100

0,6	20	7,14	0,324	D1400
	40	6,84	0,282	D1400
	60	3,74	0,207	D500

Из таблицы 4 и рис. 1 следует, что при одинаковых значениях водоцементного отношения прочность при сжатии ГПС-бетона уменьшается с повышением содержания в его составе ГПС.

Теплопроводность ГПС-бетона по данным таблицы 4 изменяется от 0,207 до 0,375 Вт/м<sup>2</sup>К. Наименьшая теплопроводность достигается при В/Ц = 0,6 и содержании ГПС 60 %. На величину теплопроводности существенное влияние оказывает содержания пористого заполнителя в структуре материала: чем больше его содержание в составе бетона, тем меньше значение теплопроводности, что полностью подтверждается результатами испытаний.

На рис. 2 приведены фотографии скола образцов ГПС-бетона полученных составов после их испытания на прочность при сжатии.

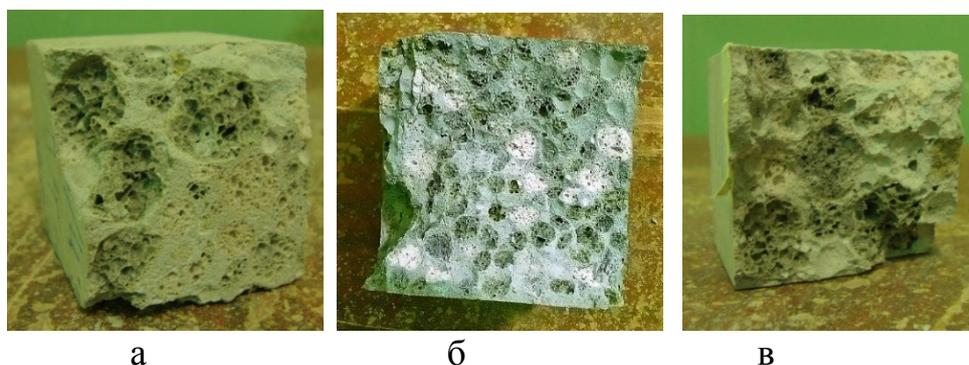


Рис. 2. Вид поверхности скола образцов ГПС-бетона: а – В/Ц = 0,4; б – В/Ц = 0,5; в – В/Ц = 0,6

Как видно из рис. 2, ГПС прочно связано с цементным камнем, что подтверждается характером разрушения образцов: на поверхности скола не наблюдаются цельные гранулы заполнителя, а само разрушение проходит по наиболее слабым участкам ГПС.

По результатам проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Метод математического планирования эксперимента позволил подобрать составы ГПС-бетона, а также описать изменения средней плотности и прочности при сжатии композита в зависимости от состава с помощью уравнений регрессии 3-го порядка.

2. Оптимальным и наиболее эффективным с точки зрения обеспечения наилучшего сочетания физико-механических и теплотехнических свойств является состав ГПС-бетона с содержанием ГПС 20-40% и водоцементным отношением от 0,4 до 0,6.

3. Варьируя долей ГПС в составе бетона и величиной его водоцементного отношения, можно получить образцы легкого ГПС-бетона с маркой по плотности D500-D1500, при прочности 3,74–10,93 МПа и величине теплопроводности 0,207–0,375 Вт/м·К. Подобранный состав ГПС-бетона является оптимальным по достижению максимальных показателей прочности и плотности при более низком расходе цемента и заполнителя.

Полученные легкие бетоны согласно ГОСТ 25820-2014 относятся к конструкционно-теплоизоляционным и могут использоваться как стеновые ограждающие конструкции и покрытия в зданиях и сооружениях различного назначения.

### Литература

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

2. 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.

---



3. Сопегин Г.В., Семейных Н.С., Федосеев А.В. Оценка физико-механических свойств пористых заполнителей для легких бетонов // Вестник МГСУ. 2018. Т.13. №2(113). С. 203-212.

4. 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.

5. Rincón A., Giacomello G., Pasetto M., Bernardo E. Novel 'inorganic gel casting' process for the manufacturing of glass foams. // Journal of the European Ceramic Society. 2017. Vol. 37. Issue 5. pp. 2227-2234.

6. Bianchi Janetti M., Plaz T., Ochs F., Klesnil O., Feist W. Thermal conductivity of foam glass gravels: a comparison between experimental data and numerical results // Energy Procedia. 2015. Vol. 78. pp. 3258-3263.

7. Marcelo T.Souza, Bianca G.O.Maia, Luyza B.Teixeira, Karine G.de Oliveira, Alexandre H.B.Teixeira, Antonio P.Novaes de Oliveira. Glass foams produced from glass bottles and eggshell wastes // Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 111. pp. 60-64.

8. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: изд-во АСВ, 2003. 500 с.

9. Тухарели В.Д., Абухба Б.А., Чередниченко Т.Ф. Математический подход при планировании эксперимента по фракционированию кварцевого песка для бетонных смесей // Инженерный вестник Дона, 2017, №1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_83\\_Tuhareli.pdf\\_68af0f771a.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_83_Tuhareli.pdf_68af0f771a.pdf).

10. Инюшкин Н.В., Щелчков И.П., Аитова А.И., Шевченко Е.А., Маньков М.Г., Перфилов С.А., Токарева Н.А. Планирование эксперимента по улавливанию летучей золы ТЭС в электроциклоне // Инженерный вестник Дона, 2013, №2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_28\\_inyushkin.pdf\\_1603.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_28_inyushkin.pdf_1603.pdf).

---

## References

1. Popov M.Yu. Nauchnoe obozrenie. 2015. №16. pp. 162-167.
2. Davidyuk A.N. Nauchnyy vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2008. № 4. pp. 100–108.
3. Sopegin G.V., Semeynykh N.S., Fedoseyev A.V. Vestnik MGSU. 2018. Vol. 13. № 2(113). pp. 203-212.
4. Sopegin G.V., Semeynykh N.S. Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. 2018. № 3. pp. 68–78.
5. Rincón A., Giacomello G., Pasetto M., Bernardo E. Journal of the European Ceramic Society. 2017. Vol. 37. Issue 5. pp. 2227-2234.
6. Bianchi Janetti M., Plaz T., Ochs F., Klesnil O., Feist W. Energy Procedia. 2015. Vol. 78. pp. 3258-3263.
7. Marcelo T.Souza, Bianca G.O.Maia, Luyza B.Teixeira, Karine G.de Oliveira, Alexandre H.B.Teixeira, Antonio P.Novoes de Oliveira. Process Safety and Environmental Protection. 2017. Vol. 111. pp. 60-64.
8. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. Izdatel'stvo ACB. Moscow, 2003. 500 p.
9. Tuhareli V.D., Abukhba B.A., Cherednichenko T.F. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2017, № 1. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_83\\_Tuhareli.pdf\\_68af0f771a.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_83_Tuhareli.pdf_68af0f771a.pdf).
10. Inyushkin N.V., Shchelchikov I.P., Aitova A.I., Shevchenko E.A., Man'kov M.G., Perfilov S.A., Tokareva N.A. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2. URL: [ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD\\_28\\_inyushkin.pdf\\_1603.pdf](http://ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_28_inyushkin.pdf_1603.pdf).