

## Разработка состава мелкозернистого теплоизоляционного бетона на гранулированном пеностекле

*П.Э. Соколов, В.В. Лупиногин, Д.А. Аржановский, М.В. Соколов,  
В.И. Каранузов*

*Волгоградский государственный технический университет, Волгоград*

**Аннотация:** Ужесточение требований к энергоэффективности зданий способствует разработке и внедрению в строительстве современных легких бетонов на эффективных пористых заполнителях. Основными требованиями к легким теплоизоляционным бетонам, в том числе мелкозернистым являются обеспечение низких показателей плотности и как следствие теплопроводности при относительно высокой прочности. Разработан состав легкого теплоизоляционного мелкозернистого бетона с использованием трех фракций гранулированного пеностекла. Для проведения исследований был использован центральный композиционный план, который позволил определить оптимальные расходы отдельных фракций гранулированного пеностекла и получить легкий теплоизоляционный мелкозернистый бетон с наименьшей плотностью. На основании полученных результатов исследований был произведен расчет коэффициента теплопроводности по эмпирическим формулам. Результаты исследований были проанализированы, получены их описательные статистики, которые представлены в виде диаграмм и графиков. На основании анализа результатов исследований получены уравнения регрессии и установлена степень влияния отдельных фракций гранулированного пеностекла на плотность и коэффициент теплопроводности. Проведена оптимизация состава материала и рассчитано соотношение между фракциями мелкого заполнителя позволяющие получить наименьшую среднюю плотность.

**Ключевые слова:** мелкозернисты бетон, гранулированное пеностекло, коэффициент теплопроводности, средняя плотность, прочность, план эксперимента, регрессия, оптимизация состава.

Ужесточение требований к энергоэффективности зданий и сооружений в соответствии с СП 50.13330.2024. Тепловая защита зданий значительно повысило интерес к теплоизоляционными материалам, отвечающим предъявляемым требованиям по теплозащите. Капитальное строительство нуждается в различных видах теплоизоляционных материалов.

При тщательном рассмотрении технологии получения и применения теплоизоляционных материалов было установлено, что имеет место потребность в теплоизоляционных материалах близких по своим свойствам, составу и строению к бетонам на основе портландцемента.

Целью исследования является получение мелкозернистого теплоизоляционного бетона на гранулированном пеностекле, с улучшенными физическими и теплотехническими характеристиками и возможностью его применения как в сборном так и монолитном домостроении

Пенокристаллические материалы и изделия на их основе обладают высокими теплофизическими и механическими свойствами, что делает их применение перспективным для теплоизоляции строительных конструкций [1]. Разработка составов таких материалов и исследование их свойств представляются весьма актуальными [2].

Распространению и внедрению материалов на основе пеностекольной продукции различного назначения (блоки, плиты, гравий, песок) способствует наличие на территории РФ производств этих материалов, в том числе и крупных [3], а также актуализация нормативной документации [4]. Ужесточение требований к энергоэффективности зданий делает актуальным использование легких теплоизоляционных бетонов на эффективных пористых заполнителях [5]. Основным требованием для таких заполнителей является низкий показатель плотности и водопоглощения при относительно высокой прочности.

В случае с мелкозернистыми бетонами, предназначенными для теплоизоляции строительных конструкций, основной характеристикой определяющей теплофизические свойства является плотность [6] и фракционный состав мелкого заполнителя [7].

Особый интерес представляют работы направленные на поиск и анализ математических моделей позволяющих описать оптимальный фракционный состав заполнителей [8]. Наряду с этим для определения оптимальных расходов компонентов целесообразно использование методов планирования эксперимента [9].

В качестве мелкого заполнителя для разработки теплоизоляционного мелкозернистого бетона было использовано гранулированное пеностекло, отвечающее требованиям ГОСТ 33676-2015. Материалы и изделия из пеностекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Классификация. Термины и определения. и ТУ 5914-001-86700706-2008. Универсальный пористый термоизоляционный материал «PENOSTEK». Прочность материала составляет не менее 0,4 МПа. При проведении исследований были использованы три фракции гранулированного пеностекла: 0,25 – 0,5 мм; 0,5 – 1,0 мм и 1,0 – 2,0 мм. Применяемый материал имеет насыпную плотность 100 – 150 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводность не более 0,061 Вт/м·°С.

В качестве вяжущего вещества использовался портландцемент ПЦ 500-Д20-ПГ. Активность применяемого вяжущего на момент проведения исследований составляла  $R_{сж} = 24,3$  МПа, а предел прочности при изгибе  $R_{изг} = 5,8$  МПа.

Для проведения исследований был принят центральный композиционный план с тремя факторами, в качестве которых выступали применяемые фракции гранулированного ячеистого стекла. Интервалы варьирования фракций гранулированного ячеистого стекла были приняты на основании проведенного анализа литературных источников [10, 11] и составили для фракций: 0,25 – 0,5 мм – 0,05 – 0,15 объемных частей; 0,5 – 1,0 мм – 0,1 – 0,3 объемных частей; 1,0 – 2,0 мм – 0,25 – 0,75 объемных частей. Для контрольного образца соотношение всех трех фракций было взято в равных пропорциях. В качестве функций отклика были приняты – предел прочности при сжатии  $Y_1$  и средняя плотность полученных образцов  $Y_2$ .

Изготовление контрольного и экспериментальных образцов производилось в следующей последовательности. Отмеренное количество гранулированного ячеистого стекла каждой фракции тщательно перемешивалось с требуемым количеством вяжущего вещества в сухом

---

состоянии. К перемешанным компонентам добавлялась вода в необходимом количестве, и процесс перемешивания продолжался до получения однородной массы. Готовая смесь укладывалась в подготовленные формы, уплотнялась, твердела и набирала прочность в соответствии с требованиями ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.

Таблица № 1

Результаты проведенных исследований (фрагмент)

№ п/п	Факторы			Отклик	
	X1 (A)	X2 (B)	X3 (C)	Прочность при сжатии, Y1	Плотность, Y2
1	18,4	20	50	3,96	0,563
2	10	20	92	3,54	0,543
3	10	20	50	2,50	0,522
4	5	10	75	2,08	0,492
5	5	30	75	1,67	0,541

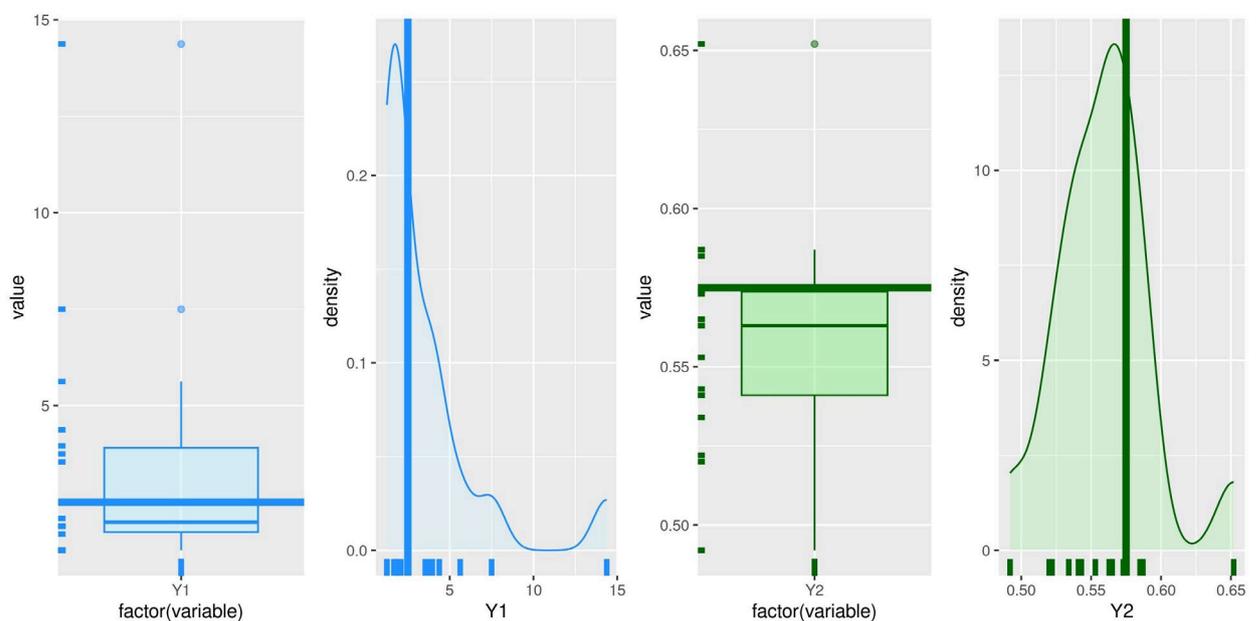


Рис. 1. – Коробчатые диаграммы, диаграммы ядерной функции плотности для функции отклика и графики-щетки

В результате проведения исследований по принятому плану эксперимента были получены результаты, приведенные в таблице № 1.

У контрольного состава, состоящего из смеси трех фракций гранулированного пеностекла в равных пропорциях, получена средняя плотность в воздушно-сухом состоянии, равная – 0,575 кг/м<sup>3</sup>.

Для функции отклика на рис. 1 приведено графическое представление полученных результатов исследований.

Коробчатые диаграммы, приведенные на рис. 1 показывают распределение значений переменных отклика и представляют пять параметров: минимальное и максимальное значение, нижний и верхний квартиль и медиану. Сплошной горизонтальной линией на коробчатых диаграммах и сплошной вертикальной линией на диаграммах ядерной функции плотности показаны значения соответствующие величине для контрольного состава. На коробчатой диаграмме для предела прочности при сжатии имеется два выброса, а на коробчатой диаграмме для средней плотности – один выброс. Т.е. эти значения выходят за диапазон в  $\pm 1,5$  межквартильного размаха, разности верхнего и нижнего квартилей.

На левых вертикальных осях коробчатых диаграмм и нижних горизонтальных осях диаграмм ядерной функции плотности, с помощью графика-щетки нанесены реальные значения результатов исследований. Коробчатая диаграмма для предела прочности при сжатии показывает сдвиг распределения в положительную сторону, при этом полученные при исследовании результаты располагаются «практически» равномерно по обе стороны относительно результата контрольного состава. Коробчатая диаграмма для средней плотности имеет сдвиг в отрицательную сторону, а полученные результаты исследований в большинстве своем показывают меньшую плотность, нежели контрольный состав. Приведенные на рис. 1 диаграммы ядерной функции плотности весьма близки к форме распределения Лапласа. Однако если не учитывать выбросы, то диаграмма

---

для предела прочности при сжатии имеет незначительную бимодальную тенденцию со смещением в меньшую сторону.

Результаты проведенных исследований были использованы для расчетов коэффициента теплопроводности полученных составов (см. таблицу №2 и рис. 2), с использованием формул Б.Н. Кауфмана (У3) [12] и проф. В.П. Некрасова (У4) [13].

Формула определения коэффициента теплопроводности Б.Н. Кауфмана для неорганических связанных материалов смешанного строения, в сухом состоянии имеет следующий вид:

$$\lambda = 0,0935 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot 2,28^{\gamma} + 0,025 \quad , \quad (1)$$

где  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности бетона в сухом состоянии при средней температуре  $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$ , ккал/м·час·град;  $\gamma$  - объемный вес бетона в сухом состоянии, т/м<sup>3</sup>.

Формула для определения коэффициента теплопроводности материала проф. В.П. Некрасова:

$$\lambda = 1,16 \cdot \sqrt{0,0196 + 0,22 \cdot d^2} - 0,16 \quad , \quad (2)$$

где  $d$  – относительная плотность, которая выражает отношение средней плотности материала к плотности стандартного вещества – воды при температуре  $4^{\circ}\text{C}$ , величина безразмерная.

Таблица № 2

Результаты расчетов коэффициента теплопроводности (фрагмент)

№ п/п	Формула Б.Н. Кауфмана	Формула проф. В.П. Некрасова
1	2	3
1	0,136	0,187
2	0,132	0,177
3	0,128	0,167
4	0,123	0,153
5	0,132	0,176

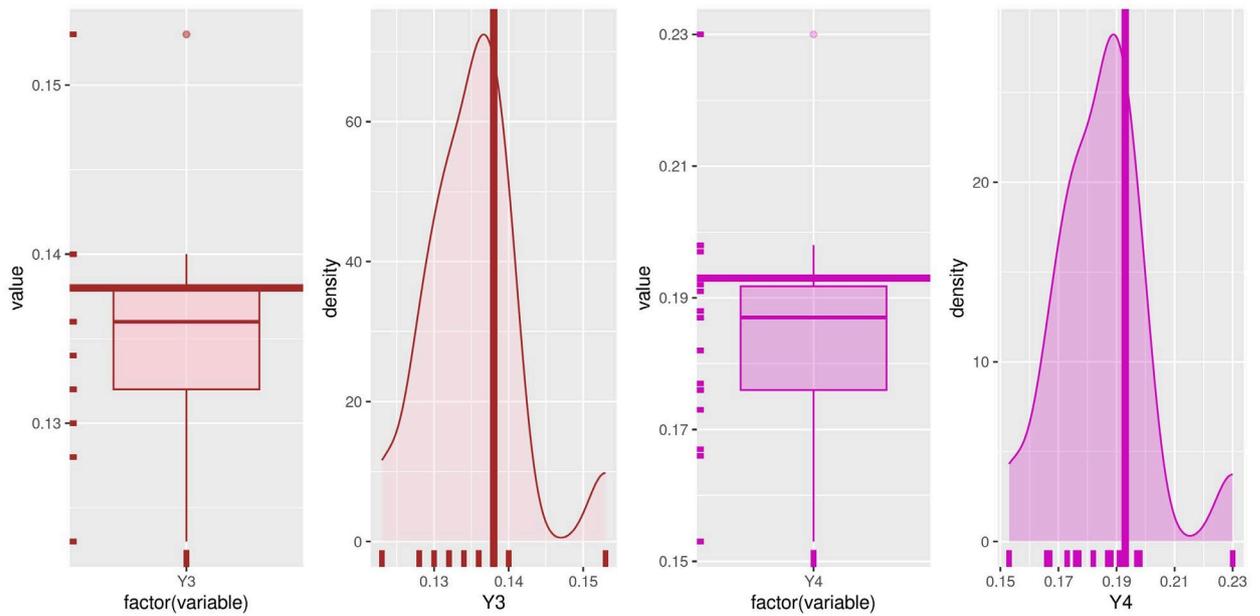


Рис. 2. – Коробчатые диаграммы, диаграммы ядерной функции плотности для рассчитанных показателей коэффициента теплопроводности и графики-щетки

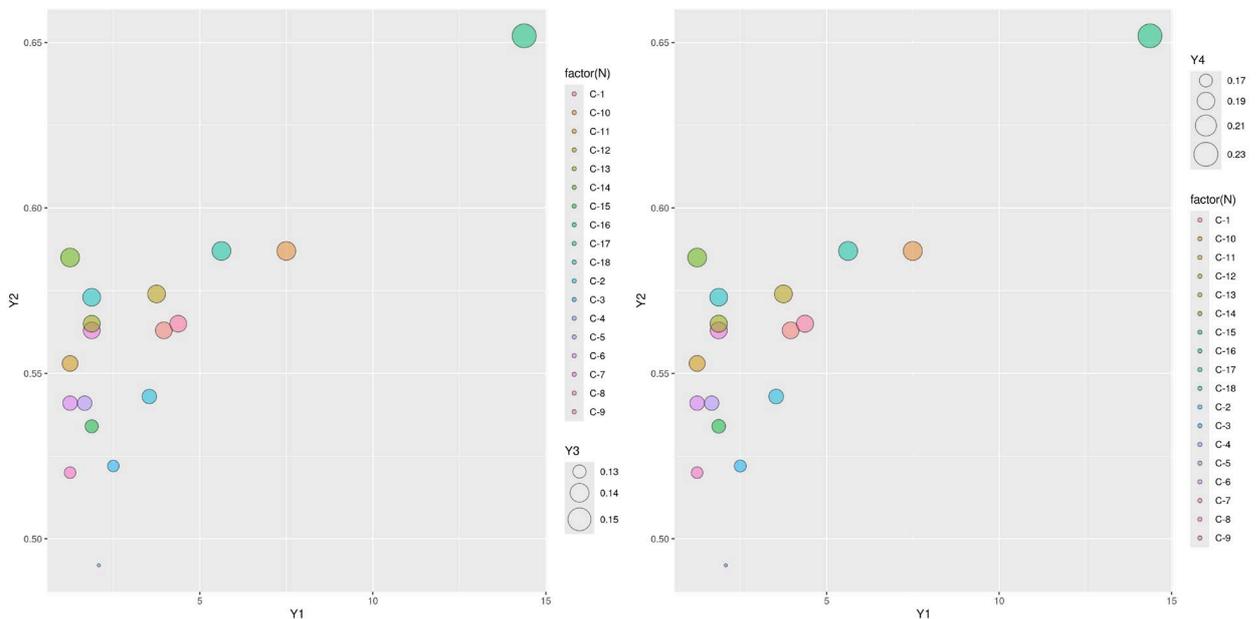


Рис. 3. – Пузырьковые диаграммы для рассчитанных коэффициентов теплопроводности (справа для формулы Б.Н. Кауфмана и слева для формулы проф. В.П. Некрасова)

Коробчатые диаграммы, приведенные на рис. 2 имеют по одному выбросу. Для обеих диаграмм имеет место значительный сдвиг в

положительную сторону. Форма диаграмм ядерной функции плотности близка к форме распределения Лапласа.

Для отображения взаимосвязи между тремя количественными переменными при помощи двумерной диаграммы создадим двухмерную диаграмму рассеяния и используем размер точек для представления значений третьей переменной (см. рис. 3).

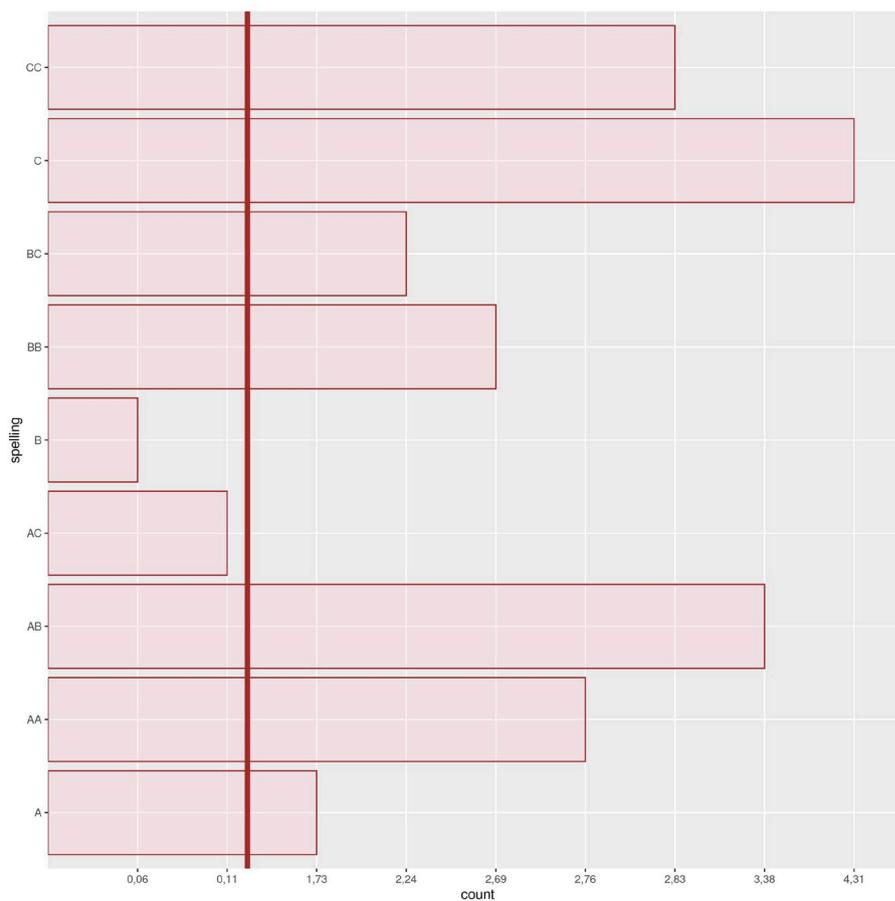


Рис. 4. – Оценка влияния факторов по закону Парето

Эта диаграмма рассеяния показывает взаимосвязь между прочностью при сжатии и плотностью мелкозернистого теплоизоляционного бетона на гранулированном пеностекле, а размер точек пропорционален рассчитанному коэффициенту теплопроводности для различных составов. Как видно из рис. 3 наибольшее значение коэффициента теплопроводности имеет состав С-16, которое составляет 0,153 для формулы Б.Н. Кауфмана и 0,23 для формулы проф. В.П. Некрасова. Минимальное значение коэффициента

теплопроводности 0,123 и 0,153 для формул Б.Н. Кауфмана и проф. В.П. Некрасова соответственно, имеет состав С-4.

С помощью гистограммы Парето оценим значимость факторов (см. рис. 4). На гистограмме отображены абсолютные значения влияния факторов и их взаимодействий. Сплошная вертикальная линия указывает границу соответствующую табличному значению критерия Стьюдента, которое в данном случае составляет – 2,228.

Факторы и взаимодействия, у которых рассчитанные значения критерия Стьюдента превышают табличное значение (т.е. пересекают вертикальную линию) являются статистически значимыми. Как видно из диаграммы незначимыми являются фактор  $X_2(B)$  и взаимодействие  $X_1X_3(AC)$ . Таким образом, из уравнения регрессии можно исключить незначимое взаимодействия, однако необходимо оставить фактор  $X_2$ , т.к. его отсутствие не позволит получить иерархическое уравнение.

Проведенная проверка воспроизводимости опытов показала, что для критерия Кохрена  $G_{\max} < G_{кр}$ , а для критерия Фишера  $F < F_{кр}$ , следовательно, исследованные функции откликов однородны, а модели результатов адекватны.

Среди функций отклика и рассчитанных на их основе показателей наиболее важным в данном случае является средняя плотность, поэтому для нее полная регрессионная модель будет иметь вид:

$$R_{он} = 0,684 - 0,00048X_1 - 0,0038X_2 - 0,0043X_3 + 0,000541X_1^2 + 0,000132X_2^2 + 0,000022X_3^2 - 0,000445X_1X_2 + 0,000006X_1X_3 + 0,000059X_2X_3 + \varepsilon, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  - отклонение наблюдаемых значений от модельных, сумма которых равна 0,0186.

Оценку адекватности полученной модели можно сделать на основании коэффициента детерминации, который составляет 71,68%. Следовательно, характер связи для исследованных показателей можно оценить как сильную.

Полученные уравнения позволяют построить пространственные графики для исследованных функций. На рис. 5 и 6 приведены контурный график и график поверхности для зависимости средней плотности от расхода двух фракций гранулированного пеностекла 0,25-0,5 мм и 1,0-2,0 мм. Как видно из рис. 5 наименьшее значение средней плотности мелкозернистого теплоизоляционного бетона достигается, когда расход гранулированного пеностекла фракции 0,25-0,5 мм составляет 8,5%, расход гранулированного пеностекла фракции 1,0-2,0 мм составляет 71%, при расходе гранулированного пеностекла фракции 0,5-1,0 мм – 20%.

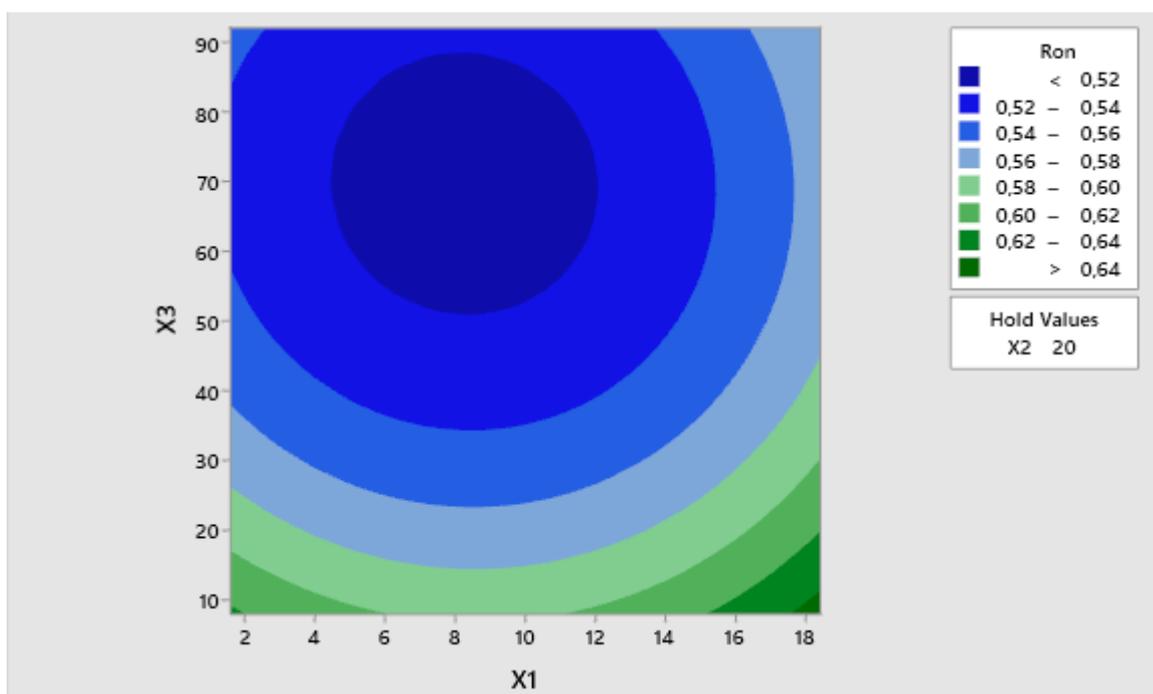


Рис. 5. – Контурный график зависимости средней плотности от расхода фракций гранулированного пеностекла

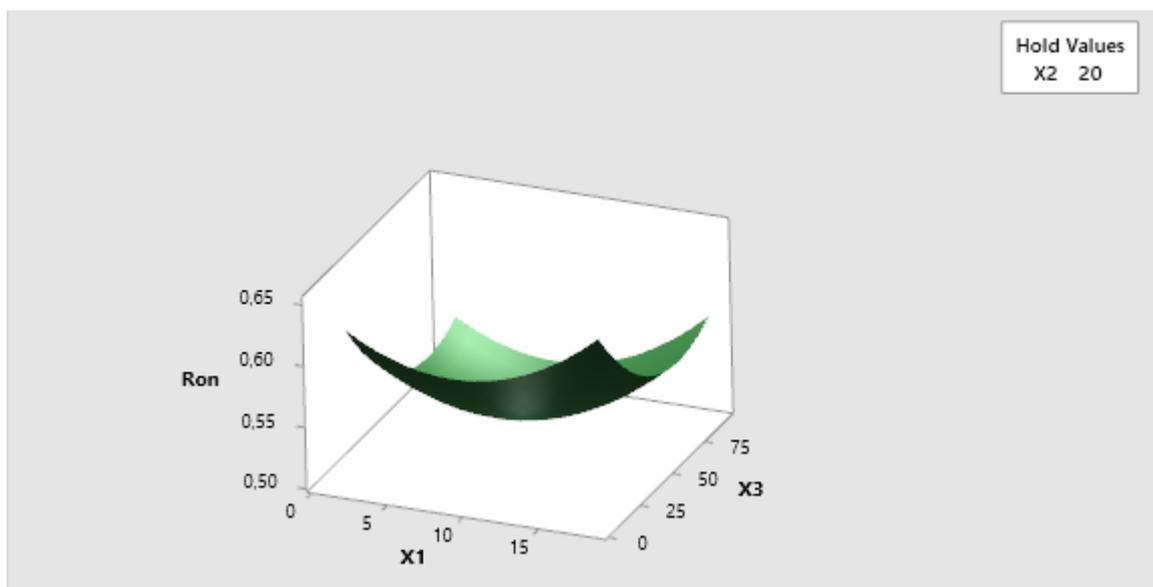


Рис. 6. – График поверхности зависимости средней плотности от расхода фракций гранулированного пеностекла

Полученная в результате исследований регрессионная модель позволяет произвести оптимизацию состава и определить расход фракций гранулированного пеностекла позволяющий получить наименьшую среднюю плотность мелкозернистого теплоизоляционного бетона (см. рис. 7).

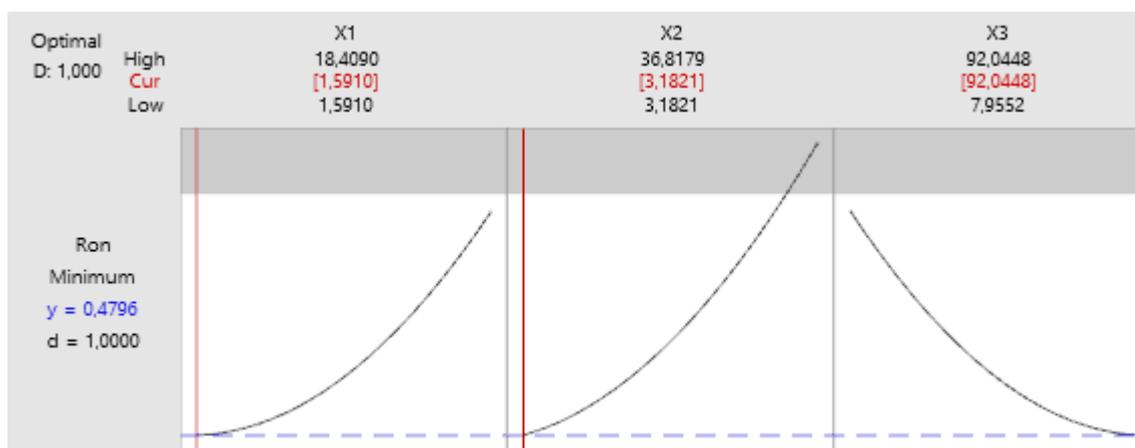


Рис. 7. – График поверхности зависимости средней плотности от расхода фракций гранулированного пеностекла

Как видно из рис. 7 используя три фракции гранулированного пеностекла с расходами 1,59, 3,18 и 92,04 объемные части соответственно возможно получить мелкозернистый теплоизоляционный бетон с плотностью

0,48 т/м<sup>3</sup>. В этом случае коэффициент теплопроводности будет составлять 0,121 – по формуле Б.Н. Кауфмана и 0,147 – по формуле проф. В.П. Некрасова, что на 12,7% и 23,5% соответственно меньше чем у контрольного состава.

В соответствии с целью работы определено соотношение, между фракциями гранулированного пеностекла позволяющее получить мелкозернистый теплоизоляционный бетон, имеющий наименьшую плотность и наилучшие показатели коэффициента теплопроводности. Проведение оптимизации расхода использованных фракций гранулированного пеностекла, позволяющая получить более низкие показатели средней плотности. Применение методов планирования эксперимента позволит при большем количестве факторов определить оптимальный фракционный состав для достижения поставленных целей, которыми могут быть как минимальная плотность, так и минимальный расход цемента.

### Литература

1. Портнягин Д.Г., Селиванов Ю.В., Селиванов В.М., Шульгина А.Д. Составы и свойства пенокристаллических материалов из композиций стеклобоя и высококальциевого шлака // Инженерно-строительный журнал. 2011. №8. С. 25-28. DOI: 10.5862/MCE.26.4.
2. Fernandes H.R., Tylyaganov D.U., Ferreira I.M.F. Preparation and characterization of foams from sheet glass and fly ash using carbonates as foaming agents // Ceramics international. 2009. №35. Pp. 229-239.
3. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature // Construction and building materials. 2019. V. 215. Pp. 623-632.
4. Кривоножко Е.В., Минько Н.И., Лазарева Е.А. Выявление зависимости прочностных характеристик пеностекольной продукции от требований в

нормативной документации // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2021. №1. С. 69-77. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-69-77.

5. Дамдинова Д.Р., Оксахоева Э.А., Соктоева И.Ю. О возможности использования пеностеклянного заполнителя в легких бетонах // Всероссийская научно-практической конференция «Инновационные технологии в науке и образовании». Улан-Удэ.: БГУ, 2017. С. 23-31. DOI: 10.1810/978-5-9793-1131-9-23-31.

6. Ляшенко Д.А., Соколов П.Э., Перфилов В.А. Вспученный фиброгипсовый материал // Инженерный вестник Дона, 2021, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924/.

7. Мирюк О.А. Оптимизация фракционного состава техногенного заполнителя мелкозернистого бетона. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2013. №4 (44). С. 89-93.

8. Наумова Ю.А., Гордеева И.В. Анализ математических моделей для описания фракционного состава дисперсных эластичных заполнителей // Российский технологический журнал. 2019. Т.7. №5. С. 62-78. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-5-62-78.

9. Соколов П.Э., Землянский Д.П., Власов М.А., Леонтьев В.С., Карапузов В.И. Разработка состава мелкозернистого бетона на некондиционных компонентах с применением комплексной модифицирующей добавки // Инженерный вестник Дона, 2024, №4 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9174/.

10. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: АСВ, 2003. 500 с.

11. Богданов Р.Р., Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона // Известия КГАСУ. 2019. №4 (50). С. 327-335.

---

12. Кауфман Б.Н. Теплопроводность строительных материалов. М.: Государственное издательство по строительству и архитектуре. 1955. 160 с.
13. Кислицына С.Н. Энергоэффективные строительные материалы. Пенза: ПГУАС, 2014. – 36 с.

### References

1. Portnyagin D.G., Selivanov Yu.V., Selivanov V.M., Shul'gina A.D. Inzhenerno-stroitel'nyy zhurnal. 2011. №8. pp. 25-28. DOI: 10.5862/MCE.26.4.
  2. Fernandes H.R., Tylyaganov D.U., Ferreira I.M.F. Ceramics international. 2009. №35. pp. 229-239.
  3. Ji R., Zheng Y., Zou Z., Chen Z., Wei S., Jin X., Zhang M. Construction and building materials. 2019. V. 215. pp. 623-632.
  4. Krivonozhko E.V., Min'ko N.I., Lazareva E.A. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki. 2021. №1. pp. 69-77. DOI: 10.17213/0321-2653-2021-1-69-77.
  5. Damdinova D.R., Oksakhoeva E.A., Soktoeva I.Yu. Vserossiyskaya nauchno-prakticheskoy konferentsiya «Innovatsionnye tekhnologii v nauke i obrazovanii». Ulan-Ude.: BGU, 2017. pp. 23-31. DOI: 10.1810/978-5-9793-1131-9-23-31.
  6. Lyashenko D.A., Sokolov P.E., Perfilov V.A. Inzenernyj vestnik Dona, 2021, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2021/6924/).
  7. Miryuk O.A. Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova. 2013. №4 (44). pp. 89-93.
  8. Naumova Yu.A., Gordeeva I.V. Rossiyskiy tekhnologicheskij zhurnal. 2019. T.7. №5. pp. 62-78. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-5-62-78.
  9. Sokolov P.E., Zemlyanskiy D.P., Vlasov M.A., Leont'ev V.S., Karapuzov V.I. Inzenernyj vestnik Dona, 2024, №4. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9174/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2024/9174/).
-



10. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona [Concrete technology]. M.: ASV, 2003. 500 p.
11. Bogdanov R.R., Ibragimov R.A., Korolev E.V. Izvestiya KGASU. 2019. №4 (50). pp. 327-335.
12. Kaufman B.N. Teploprovodnost' stroitel'nykh materialov [Thermal conductivity of building materials]. M.: Gosudarstvennoe izdatel'stvo po stroitel'stvu i arkhitekture. 1955. 160 p.
13. Kislitsyna S.N. Energoeffektivnye stroitel'nye materialy [Energy-efficient building materials]. Penza: PGUAS, 2014. 36 p.

**Дата поступления: 11.01.2025**

**Дата публикации: 25.02.2025**