

Строкова В. В., советник РААСН, д-р техн. наук, проф.,
Лозовая С. Ю., д-р техн. наук, проф.,
Соловьева Л. Н., ст. преп.
Огурцова Ю. Н., студент

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННО-ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО БЕТОНА НА ОСНОВЕ ГРАНУЛИРОВАННОГО НАНОСТРУКТУРИРУЮЩЕГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ

strokova@intbel.ru

Установлены закономерности изменения свойств конструкционно-теплоизоляционного бетона в зависимости от содержания гранулированного наноструктурирующего заполнителя и воды.

Полученные результаты позволяют дать количественную и качественную оценку влияния каждого фактора на физико-механические свойства бетона, а также определить его состав.

Ключевые слова: конструкционно-теплоизоляционный бетон, гранулированный наноструктурирующий заполнитель, рациональный состав, оптимальная структура, пористость.

Одним из эффективных строительных материалов является легкий бетон, применение которого позволяет снизить массу и повысить теплозащитные свойства конструкций, а также снизить трудоемкость и стоимость строительства. Снижение материалоемкости и теплопроводности строительных конструкций без потери их несущей способности и других эксплуатационных свойств является одной из целей повышения эффективности строительства [1]. Одним из практических путей ее достижения является разработка и применение легких и прочных бетонов с пониженной теплопроводностью и водопроницаемостью.

В данной работе проводились исследования зависимости основных свойств конструкционно-теплоизоляционного бетона, полученного на основе гранулированного наноструктурирующего заполнителя (ГНЗ) [2], от содержания основных компонентов.

Разработка оптимальных составов конструкционно-теплоизоляционных бетонов с использованием ГНЗ и исследование влияния отдельных компонентов на физико-механические свойства бетона производились с использованием метода математического планирования эксперимента второго порядка.

На физико-механические характеристики разрабатываемого бетона влияет множество параметров, такие как состав кремнеземистого компонента ГНЗ, размер и количество вводимого активного заполнителя, количество воды, время предварительной выдержки перед пропариванием, температура тепловлажностной обработки.

Для упрощения математического планирования экспериментов и уменьшения числа варьируемых факторов нами опытным путем было установлено, что в качестве наиболее значимых параметров оптимизации, характеризующих плотность, пористость, прочность при сжатии, теплопроводность и водопоглощение можно принять: количество вводимого гранулированного наноструктурирующего заполнителя и количество воды [3].

Математической моделью физико-механических свойств конструкционно-теплоизоляционных бетонов являются функции (1), связывающие параметры оптимизации $\rho, R_{сж}, \lambda, П, W$ с переменными факторами.

$$\rho, R_{сж}, \lambda, П, W = f(z, v); \quad (1)$$

где z – количество гранулированного заполнителя, %; v – количество воды, %; ρ – плотность бетона, кг/м³; $R_{сж}$ – прочность бетона на сжатие, МПа; λ – теплопроводность бетона, Вт/м·К; $П$ – пористость бетона, %; W – водопоглощение бетона, %.

Для сравнения и определения влияния указанных факторов на процесс уплотнения приведем формулы преобразования с учетом данных таблицы 1 получим:

$$x_1 = \frac{z - 37,5}{19}; \quad x_2 = \frac{v - 27,5}{4,4}. \quad (2)$$

Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования					Интервал варьирования
натуральный вид	кодированный вид	-1,68	-1	0	1	+1,68	
Количество гранулированного заполнителя, %	X ₁	5	18,5	37,5	56,5	70	19
Количество воды, %	X ₂	20	23,1	27,5	31,9	35	4,4

В соответствии с принятым планом установлено пять уровней варьирования факторов: 1 – минимальный; 0 – средний; +1 – максимальный; -1,68, +1,68 – звездные (табл. 1).

Таблица 2

Матрица планирования

№ точки плана	X ₁	X ₂	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₁ X ₂
1	-1	-1	1	1	1
2	1	-1	1	1	-1
3	-1	1	1	1	-1
4	1	1	1	1	1
5	-1,682	0	2,829	0	0
6	1,682	0	2,829	0	0
7	0	-1,682	0	2,829	0
8	0	1,682	0	2,829	0
9	0	0	0	0	0

Для удобства планирования эксперимента составим матрицу двухфакторного эксперимента (табл. 2), в соответствии с которым и проводили исследование.

Таким образом, нами были выбраны необходимые уровни варьирования факторов так, чтобы любое их сочетание, которое предусмотрено планом, было реализуемо на разработанных моделях и учитывало реальные технологические условия.

Для выявления механизма создания оптимальной структуры и определения рационального состава конструкционно-теплоизоляционного бетона, полученные гранулы из опоки вводились в бетон в различном процентном содержании (табл. 3).

Таблица 3

Составы и физико-механические характеристики конструкционно-теплоизоляционного бетона на основе ГНЗ

№ состава п/п	Факторы, %		Физико-механические характеристики бетона				
	Заполнитель	Вода	Пористость, %	Средняя плотность, кг/м ³	Предел прочности на сжатие, МПа	Теплопроводность, Вт/м·К	Водопоглощение по массе, %
1	18,5	23,1	30	1800	38	0,9	11,4
2	56,5	23,1	48	1300	12	0,28	5,5
3	18,5	31,9	35	1830	30	0,95	11,8
4	56,5	31,9	52	1280	10	0,38	6,5
5	5	27,5	23	1920	43	0,98	11,6
6	70	27,5	52	1200	10	0,17	3,8
7	37,5	36,3	40	1580	23	0,62	10,7
8	37,5	36,3	45	1480	18	0,68	11,8
9	37,5	27,5	43	1540	20	0,65	11,2

На основании результатов испытаний были получены уравнения регрессии, выражающие зависимость кинетики изменения пористости, плотности, прочности, теплопроводности и водопоглощения в зависимости от количества гранулированного заполнителя и воды.

В кодированном виде уравнение регрессии для пористости при использовании гранулированного наноструктурирующего заполнителя имеет вид:

$$y=16,48-1,56x_1-1,88x_2-0,4x_1x_2+8,1x_1^2+9,84x_2^2 \quad (3)$$

Значение коэффициента регрессии при x_1, x_2 по критерию Стьюдента является не значимым и исключается из уравнения:

$$y=16,48-1,56x_1-1,88x_2+8,1x_1^2+9,84x_2^2 \quad (4)$$

Подставляя в уравнение (4) формулы преобразования (2) получим:

$$\Pi=447,237-1,765z-28,382v+0,00224z^2+0,508v^2 \quad (5)$$

В кодированном и декодированном виде уравнение регрессии для плотности при использовании гранулированного наноструктурирующего заполнителя имеет вид:

$$y=607,89+354,89x_1^2+344,28x_2^2 \quad (6)$$

$$\rho_{cp}=15447-73,73z-978v+0,98z^2+17,78v^2 \quad (7)$$

Для прочности на сжатие с использованием гранулированного наноструктурирующего заполнителя уравнение регрессии в кодированном и декодированном виде имеет вид:

$$y=8,45-1,56x_1-1,88x_2-0,4x_1x_2+6,49x_1^2+4,36x_2^2 \quad (8)$$

$$R_{сж}=213,94-1,3z-12,6v-0,005zv+0,02z^2+0,22v^2 \quad (9)$$

В кодированном виде уравнение регрессии для теплопроводности с использованием гранулированного наноструктурирующего заполнителя имеет вид:

$$y=0,25-1,56x_1-1,88x_2-0,4x_1x_2+0,12x_1^2+0,15x_2^2 \quad (10)$$

$$\lambda=16,47+0,024z-0,67v-0,0048zv+0,00033z^2+0,0077v^2 \quad (11)$$

В кодированном и декодированном виде уравнение регрессии для водопоглощения (по массе) с использованием гранулированного наноструктурирующего заполнителя имеет вид:

$$y=3,87-1,56x_1-1,88x_2-0,4x_1x_2+1,36x_1^2+2,62x_2^2 \quad (12)$$

$$W=121,4-0,23z-7,69v-0,0048zv+0,0037z^2+0,135v^2 \quad (13)$$

На рис. 1 изображены графики отклика изменения физико-механических свойств конструкционно-теплоизоляционного бетона в соответствии с полученными уравнениями регрессии. Трехмерные графики, отображающие влия-

ние основных факторов на характеристики бетона являются поверхностями 2-го порядка, ориентированы на оси изменения количества гранулированного заполнителя и воды.

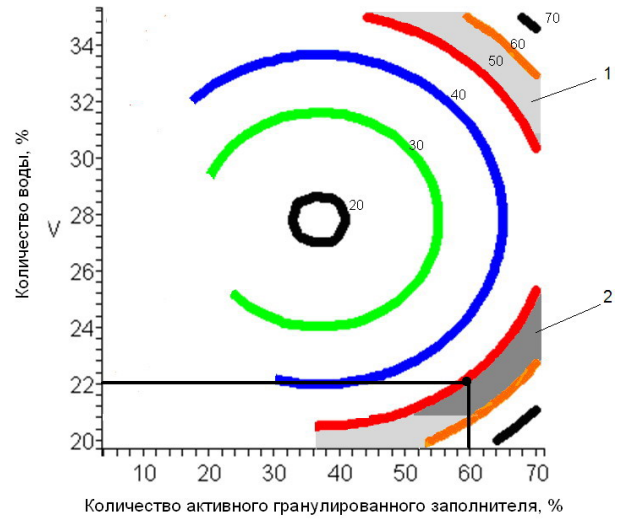
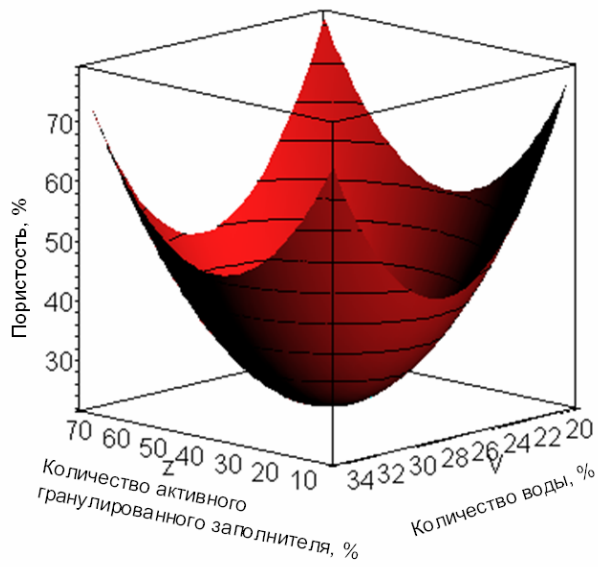
Основной целью получения математической модели и построения трехмерных графиков, а также разрезов в различных плоскостях являлось прогнозирование физико-механических свойств конструкционно-теплоизоляционного бетона для различных составов.

Для разработанного вида бетона наиболее важным показателем является пористость, варьируемая от 50 до 60 %. Анализ графика (рис. 1, а) показал, что для данной пористости количество гранулированного заполнителя варьируется от 36 до 70 %, а количество воды от 20 до 25 и от 30 до 35 %. Далее на графиках (рис. 1, б, в, г, д) для других физико-механических характеристик были отмечены зоны изменения варьируемых факторов в тех пределах как и для пористости (зона 1 рис. 1). При этом, целесообразное значение предела прочности на сжатие (10–15 МПа) можно достигнуть в интервалах варьируемых факторов от 50 до 70 % заполнителя, а значение водопоглощения (6–8 %) ограничено по количеству воды от 21 до 25 %, поэтому для получения бетона с характеристиками удовлетворяющим всем параметрам одновременно варьируемые факторы должны изменяться в следующих пределах: гранулированный заполнитель – от 51 до 70 %, вода – от 21 до 25 % (зона 2 рис. 1).

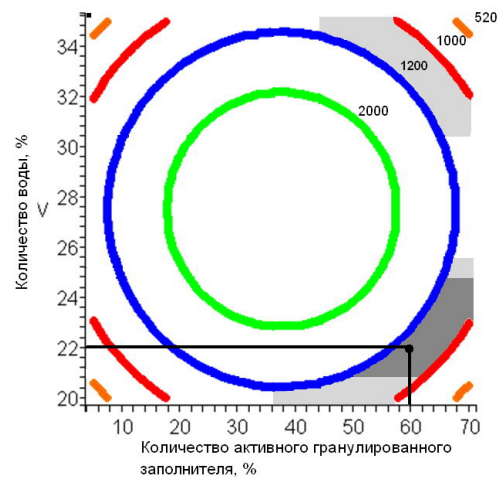
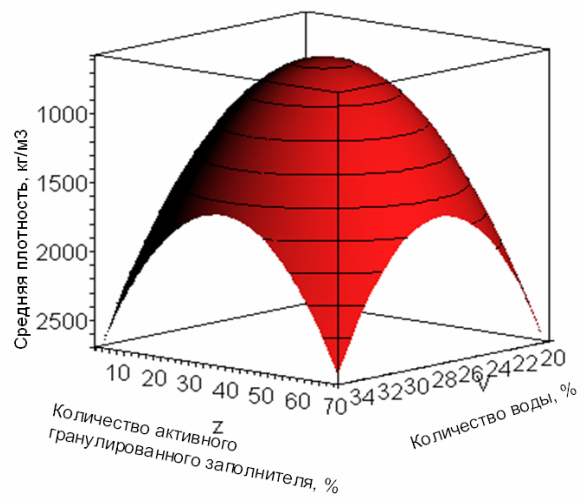
Например, бетон с пористостью равной 50 % получен при введении гранулированного наноструктурирующего заполнителя в количестве 61 % и 22 % воды. При данном составе конструкционно-теплоизоляционный бетон имеет следующие характеристики: среднюю плотность – 1200 кг/м³, прочность на сжатие – 15 МПа, водопоглощение (по массе) – 5 % и теплопроводность – 0,3 Вт/м·К. Таким образом, задавая один из интересующих параметров можно определить состав бетона и спрогнозировать остальные физико-механические свойства.

В результате проведенной работы были выявлены закономерности изменения свойств бетона, получены математические зависимости и графические интерпретации этих зависимостей, которые позволяют дать количественную и качественную оценку влияния каждого фактора в отдельности, а также в их совокупности на изменение системы «состав – свойства» и могут быть использованы для производственных рецептур бетона и прогнозирования его физико-механических свойств.

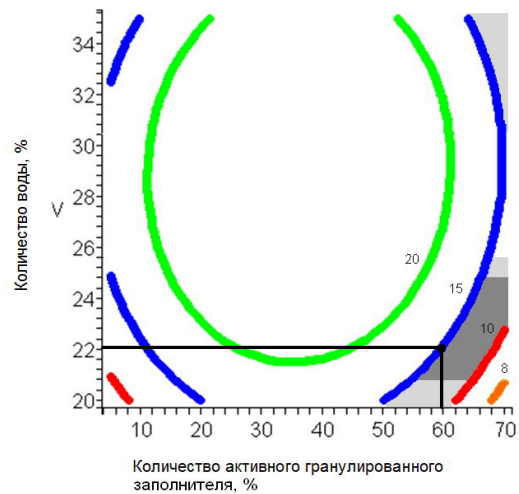
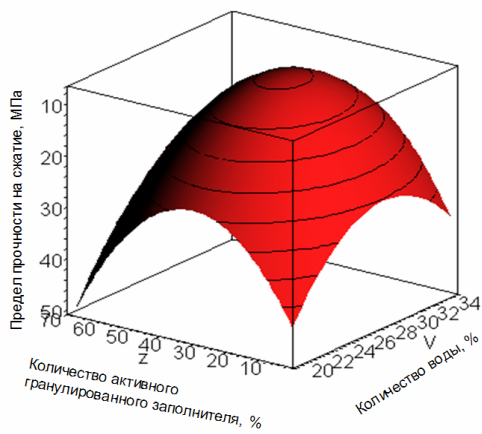
а



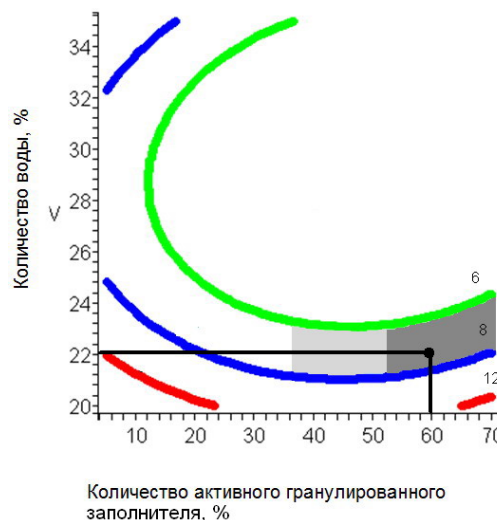
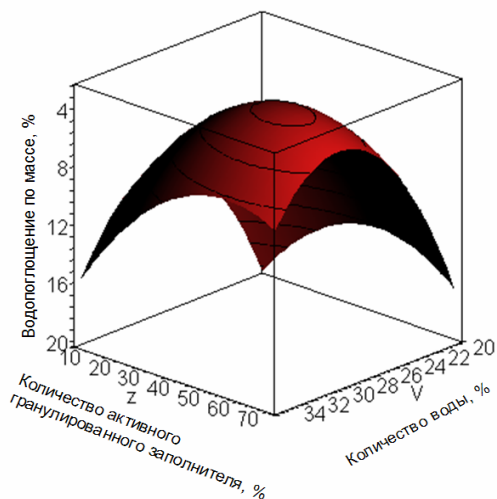
б



в



2



д

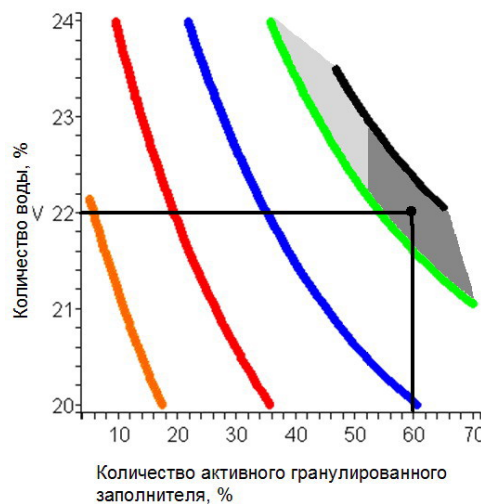
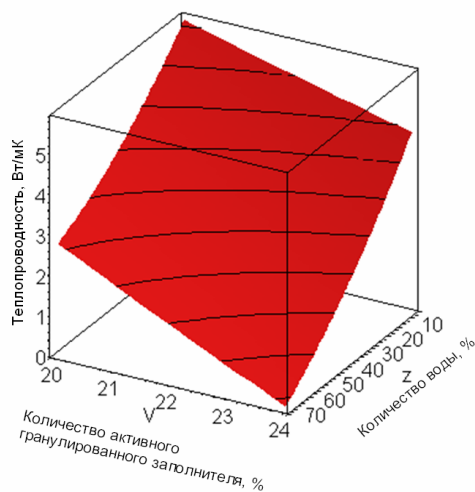


Рисунок 1. Влияние количества вводимых заполнителя и воды на физико-механические свойства легкого бетона:

a – пористость, *б* – плотность, *в* – прочность на сжатие,
г – водопоглощение (по массе), *д* – теплопроводность

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. *Строкова, В.В.* Конструкционные легкие бетоны на основе активных гранулированных заполнителей / В.В. Строкова, Л.Н. Соловьева, В.И. Мосъпан, А.П. Гринев // Строительные материалы, – М., 2009. – № 10. – С. 23–25.

3. *Бондарь, А.Г.* Планирование эксперимента в химической технологии / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха. – Киев: Вища школа, 1976. – 181 с.