

## Оптимизация состава модифицированного бетона на основе заполнителей из бетонного лома

*И.О. Егорочкина, И.А. Серебряная, А.А. Сукиасян, А.К. Тупчиев*

*Донской государственной технической университет*

**Аннотация:** Представлены результаты оптимизации состава бетона на основе заполнителей из дробленого бетона. С помощью математического и натурного моделирования подобран состав расширяющей добавки сульфоалюминатного типа, установлено оптимальное процентное соотношение компонентов модифицированного цемента, требуемое для получения материала с улучшенными эксплуатационными свойствами, получены математические модели строительно-технических свойств бетона и кинетика их изменения с учетом временного фактора и силовых и атмосферных воздействий. Проведена лабораторная и производственная апробация.

**Ключевые слова:** Строительно-технические свойства, расширяющая добавка, математическое моделирование, факторный эксперимент, влияющие факторы, уровень варьирования, матрица планирования эксперимента.

Сегодня во всем мире накоплен значительный опыт использования при производстве бетонных и железобетонных конструкций заполнителей с разномодульными включениями низкой жесткости, например дробленый бетон, кирпич, раствор, керамзитовый гравий и т.п. [1-3].

Известно, что наличие низко модульных пористых включений повышает водопотребность бетонных смесей и как следствие, увеличивает усадку материалов, что приводит к снижению основных параметров качества [4,5]. Удаление таких включений, как правило, является сложным и экономически нецелесообразным. Исследователи предлагают перенаправить усилия с очистки заполнителя от разномодульных включений на разработку технологий по компенсации негативного их влияния, например использованием расширяющихся и безусадочных цементов [6,7].

С целью компенсации усадки в бетонах на разномодульных заполнителях представляется целесообразной модификация портландцемента расширяющими добавками взамен применения дорогостоящих расширяющихся цементов промышленного производства.

---

Целью настоящей исследовательской работы является оптимизация состава бетона на основе заполнителей с разномодульными включениями с помощью математического и натурного моделирования, подбор состава конструкционного бетона с улучшенными эксплуатационными характеристиками и исследование его свойств с помощью методов математического и натурного моделирования.

Методы математического моделирования широко используются в исследовательской деятельности [8,9], позволяют оптимизировать вещественный состав, управлять формированием структуры и соответственно свойствами исследуемых материалов, устанавливать зависимость основных параметров качества от различных влияющих факторов и прогнозировать кинетику их изменения во времени и под нагрузками.

Нами изучена возможность разработки составов и исследования свойств бетонов, модифицированных расширяющей добавкой сульфоалюминатного типа с заполнителями из дробленого бетона. Составы разработаны с применением портландцемента, модифицированного расширяющей добавки сульфоалюминатного типа, подбор состава которой представлен в работе [10], песка с модулем крупности  $M_k = 1,48$  и крупным заполнителем из дробленого бетона. Рекомендации по подбору вещественного состава бетона представлены в работе [11].

С целью получения обобщенных зависимостей основных показателей качества от влияющих факторов применялись методы математического моделирования. В качестве исследуемых факторов были рассмотрены:

$X_1$  – В/Ц отношение – 0,4-0,6;

$X_2$  – коэффициент раздвижки зерен заполнителя – 1,1 – 1,6;

$X_3$  – содержание дробленого бетона, % от объема природного щебня – 2-

---

34;

$X_4$  – содержание расширяющей добавки, % от массы цемента – 0-20;

$X_5$  – время твердения в воде, сутки – 4-28.

Уровни варьирования В/Ц отношения приняты из условия получения конструкционных бетонов различных классов от В20 до В55, для которых используются бетонные смеси с В/Ц отношением 0,4 – 0,6. Как известно, оптимальное соотношение заполнителей в бетоне, при одинаковом качестве и количестве цементного теста, определяется показателем раздвижки зерен заполнителя  $\alpha$ . Достижение максимального насыщения объема бетона заполнителем и формирование структуры с контактной цементацией возможно в случае  $\alpha = 1,1$ . В случае повышения показателя до значения 1,6 предполагается формирование структуры бетона с поровой или базальной цементацией. Варьирование фактора в пределах 1,1-1,6 позволит выявить влияние концентрации низкомодульных включений на изменение свойств бетона при переходе от одного вида структуры к другому.

Обоснование вариации содержания низкомодульных включений в составе крупного заполнителя приводится в исследовательских работах [12-13] и ограничивается уровнем 35%. Для уменьшения негативного влияния последствий собственных деформаций посредством их регулирования, в исследовании, как было указано выше, использован цемент, модифицированный расширяющей добавкой, концентрация которой назначалась с учетом получения бетонов с компенсированной усадкой. По данным в пункте [14] введение добавки в количестве 10-20 % является достаточным для компенсации усадочных деформаций и получения материала с улучшенными эксплуатационными свойствами.

Значительное влияние на формирование структуры и свойств, бетонов оказывают условия его твердения (водное, воздушно-сухое и проч.).

---

Общеизвестны потенциальные возможности расширяющих цементов при обеспечении влажностного ухода набирать проектную прочность в сокращенные сроки, а в случае использования пористых низко модульных включений, без организации водного ухода, за счет самовлагообеспечения.

С учетом вышеизложенного предполагается, что введение расширяющей добавки в количестве до 20 % позволит сократить время влажностного ухода за бетоном, поэтому в план проведения экспериментов включен фактор, учитывающий степень «зрелости» бетона к моменту окончания водного выдерживания.

В качестве откликов были выбраны основные механические характеристики бетона:  $Y_1$  - прочность при сжатии ( $R_{сж}$ , МПа),  $Y_2$  – призмная прочность ( $R_{пр}$ , МПа),  $Y_3$  – прочность при растяжении ( $R_t$ , МПа),  $Y_4$  – прочность при изгибе ( $R_f$ , МПа).

В исследовательской работе реализован факторный эксперимент по плану Хартли-5 (Ha-5). Количество точек плана – 27. Количество точек в центре плана -1. Количество коэффициентов в полиноме второго порядка с пятью факторами равно 21. Анализ плана Ha-5 проводился с помощью статистического пакета Matcad. Дисперсия воспроизводимости определялась по результатам параллельных опытов в каждой точке плана.

В результате математической обработки экспериментальных данных получены адекватные модели изучаемых функций отклика.

Основным критерием возможности применения заполнителей с низко модульными включениями, такими как дробленый бетон, раствор, керамзит, кирпичный бой и т.п. в качестве заполнителя конструкционного бетона является прочность на сжатие образцов-кубов в 28 суточном возрасте. Коэффициенты экспериментально-статистических моделей функций отклика основных механических характеристик бетона представлены в таблице 1.

Таблица 1 - Коэффициенты уравнений регрессии вида

$$Y = B_0 + \sum B_i X_i + \sum B_{ii} X_i^2 + \sum B_{ij} X_{ij}$$

Коэффициенты	Функция отклика			
	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
B <sub>0</sub>	62,5	50,14	3,09	5,76
B <sub>1</sub>	-10,7	-5,7	-0,19	-0,75
B <sub>2</sub>	0,014	-0,92	-0,06	-0,26
B <sub>3</sub>	-0,5	0,98	0,034	-0,15
B <sub>4</sub>	-0,63	-1,48	-0,07	-0,1
B <sub>5</sub>	3,26	1,76	0,05	0,28
B <sub>11</sub>	-1,92	-0,79	0,08	-0,1
B <sub>22</sub>	-5,72	-2,94	0,04	-0,1
B <sub>33</sub>	-3,7	-2,68	-1,11	0,2
B <sub>44</sub>	2,71	-1,23	0,01	-0,2
B <sub>56</sub>	3,55	0,99	-0,14	0,3
B <sub>12</sub>	-0,43	0,63	-0,05	-0,45
B <sub>13</sub>	-0,14	1,07	-0,12	0,14
B <sub>14</sub>	0,69	0,03	-0,1	0,24
B <sub>15</sub>	2,13	2,88	0,09	-0,02
B <sub>23</sub>	-0,77	-0,48	0,1	0,1
B <sub>24</sub>	0,14	1,21	0,03	0,04
B <sub>25</sub>	0,54	0,73	-0,1	0,05
B <sub>34</sub>	0,2	-0,13	0,04	0,07
B <sub>35</sub>	-2,1	-1,88	0,04	0,09
B <sub>45</sub>	0,15	-0,8	0,02	0,04

По уравнениям регрессии методами линейной алгебры были построены геометрические образы изучаемых функций отклика. Анализ геометрических образов исследуемых функций отклика позволил установить оптимальные пределы варьирования основных входных параметров для получения бетонов с компенсированной усадкой с разномодульными включениями. Анализ подобластей факторного пространства позволил рекомендовать концентрацию содержания расширяющей добавки сульфоалюминатного типа в пределах 8-12 %, низко модульных включений не более 34-35 %. Установлены оптимальные для различных производственных целей параметры бетонной смеси и

степень зрелости бетона к моменту окончания водного выдерживания.

В исследовательской работе выявлена высокая эффективность методов математического и натурного моделирования для целей направленного структурообразования и формирования предпочтительных свойств конструкционных бетонов, что является определенным вкладом в развитие инновационных направлений ресурсосбережения, обогащения сырьевой базы, улучшения экологической обстановки за счет эффективного использования промышленных отходов.

### Литература

1. Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin and Snežana Marinković. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production // Sustainability, 2010, № 2, pp. 1204-1225. DOI: 10.3390/su2051204.
2. Sherif Yehia, Kareem Helal, Anaam Abusharkh, Amani Zaher, and Hiba Istaitiyeh. Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete / International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol.9, № 2, pp. 219–239. DOI 10.1007/s40069-015-0100-0.
3. Курочка, П.Н., Мирзалиев, Р.Р. Свойства щебня из продуктов дробления вторичного бетона как инертного заполнителя бетонных смесей // Инженерный вестник, 2012, № 4, ч.2. - URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1441](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1441)
4. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. Construction and Building Materials, 2012, № 26 (1), pp. 565–573. DOI 10.1155/2013/842929
5. Несветаев, Г.В., Долгова, А.В. Влияние дозировки редиспергируемых порошков и типа низко модульных включений на свойства мелкозернистого бетона. // Вестник Дагестанского государственного

технического университета. Технические науки, 2019, Т. 46, № 2, С. 167-175.

6. Звездов, А.И., Титов, М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой для возведения трещиностойких конструкций большой протяженности. // Бетон и железобетон, 2001, № 4, С. 17-20.

7. Егорочкина, И.О., Серебряная, И.А., Шляхова, Е.А., Матросов, А.А., Пронина, К.А., Кузина, А.Н. Исследование структуры контактной зоны в бетонах с комбинированными заполнителями. // Инженерный вестник Дона, 2019, № 4. URL:ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2019/5904

8. Суханов, А. В. Математические модели, численные методы и программы для оптимизации структуры и свойств металлопродукции в многостадийных системах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.18. – Липецк, 2020. – 16 с.

9. Питерский, А.М. Оптимизация решений задач водохозяйственного строительства. – Новочеркасск: НИМИ, 1995. – 115 с.

10. Ефремова, И.А. Бетоны с комбинированным заполнителем на основе портландцемента с расширяющими добавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. - Ростов-н/Д, 1997. – 18 с.

11. Егорочкина, И.О. Рекомендации по подбору состава бетонов на вторичных заполнителях с разномодульными включениями // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2014, № 3. С. 49-54.

12. Муртазаев, С-А. Ю., Саламанова, М.Ш., Гишлакаева, М.И. Формирование структуры и свойств бетонов на заполнителе из бетонного лома // Бетон и железобетон, 2008, № 5. С. 25-28.

13. Егорочкина, И.О. Структура и свойства бетонов с компенсированной усадкой на вторичных заполнителях: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05. - Ростов-н/Д, 1998. – 26 с.

---

14. Титов, М.Ю. Бетоны с компенсированной усадкой на расширяющих добавках: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05, 2012. – 24 с.

### Reference

1. Mirjana Malešev, Vlastimir Radonjanin and Snežana Marinković. Sustainability, 2010, No. 2, pp. 1204-1225. DOI: 10.3390/su2051204.
2. Yehia Sh., Helal K., Abusharkh A, Zaher A. International Journal of Concrete Structures and Materials, 2015, № 2, pp. 219–239. DOI 10.1007/s40069-015-0100-0.
3. Kurochka, P. N., Mirzaliev, R. R. Inzhenernyj vestnik Dona, 2012, № 4, ch.2. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4p2y2012/1441.
4. Kwan, W. H., Ramli, M., Kam, K. J., & Sulieman, M. Z. Construction and Building Materials, 2012, № 26 (1), pp. 565–573. DOI 10.1155/2013/842929
5. Nesvetaev, G. V., Dolgova, A.V. Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki, 2019, T.46, № 2, pp. 167-175.
6. Zvezdov, A. I., Titov, M. Yu. Beton i zhelezobeton, 2001, № 4, pp. 17-20.
7. Egorochkina, I. O., Serebryanaya, I. A., Shlyakhova, E. A., Matrosov, A. A., Pronina, K. A., Kuzina, A. N. Inzhenernyj vestnik Dona, 2019, № 4. URL: ivdon.ru/magazine/archive/n4y2019/5904.
8. Sukhanov, A.V. Matematicheskie modeli, chislennye metody i programmy dlya optimizacii struktury i svojstv metalloprodukcii v mnogostadijnyh sistemah [Mathematical models, numerical methods and programs for optimizing the structure and properties of metal products in multi-stage systems]: diss. ... kand. tehn. nauk: 05.13.18. Lipetsk, 2020. 16 p.
9. Pitersky, A.M. Optimizaciya reshenij zadach vodohozyajstvennogo stroitel'stva [Optimization of solutions to problems of water construction]. Novoчеркассk: NIMI, 1995. 115 p.





10. Efremova, I. A. Concrete with combined aggregates on the Portland cement with expanding additives [Betony` s kombinirovanny`m zapolnitelem na osnove portlandcementsa s rasshiryayushhimi dobavkami].: diss. ... kand. tehn. nayk.: 05.23.05. - Rostov-on-Don, 1997.- 18 p.
11. Egorochkina, I. O. Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, 2014. № 3. pp. 49-53.
12. Murtazaev, S.A.-Yu., Salamanova, M.Sh., Gishlakaeva, M.I. Beton i zhelezobeton, 2008, № 5, pp. 25-28.
13. Egorochkina I.O. Structure and properties of concretes with compensated shrinkage and reused aggregates. [Struktura i svojstva betonov s kompensirovannoj usadkoj na vtorichny`x zapolnitelyax]: dis. ... kand. teh. nayk: 05.23.05. - Rostov-on-Don, 1998. - 26 p.
14. Titov, M. Y. Concrete with shrinkage compensated on expanding additives [Betony s kompensirovannoj usadkoj na rasshiryayushchih dobavkah]: diss. ... kand. tehn. nayk.: 05.23.05, Moscow, 2012. - 24 p.