

Прочностные характеристики бетона с добавлением промышленных отходов

М.В. Тужилова, П.А. Щеглова

*Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир*

Аннотация: В статье исследовалось влияние промышленных отходов на прочностные характеристики бетона методом многофакторного планирования экспериментов. Рассматривалось использование различных добавок в бетонных смесях с целью улучшения экологичности, экономичности и эксплуатационных характеристик материалов. Основное внимание уделено трём видам добавок: отходам песчано-смоляных литейных форм, отсевам газодинамического напыления алюминиевых порошков и резиновой крошке из отработанных шин.

Ключевые слова: многофакторный эксперимент, методика планирования исследований, прочность, бетон, промышленные отходы.

Введение

Использование промышленных отходов в бетонных составах решает проблемы современного строительства: острую нехватку природного песка и накопление огромных объёмов производственного мусора на полигонах [1]. На долю строительной отрасли [2,3] приходится 39% мировых выбросов углекислого газа. Применение отходов как заменителя природных заполнителей значительно снижает энергозатраты на добычу, транспортировку и переработку материалов.

Отходы песчано-смоляных литейных форм служат заменителем природного песка в бетоне и позволяют сократить объёмы добычи песка, а также уменьшить отходы на полигонах. Использование таких добавок снижает себестоимость бетона, улучшает его прочность и долговечность при замене песка до 30% [4].

Отсевы газодинамического напыления алюминиевых порошков служат мелким заполнителем, снижая пористость и усадку бетона, повышая плотность и упругость. Благодаря форме частиц улучшается адгезия материала. Использование отсевов способствует созданию лёгких бетонов с пониженной теплопроводностью. Однако существует повышенная

водопотребность смеси, что требует применения ингибиторов и оптимизации состава [5].

Резиновая крошка из отработанных шин решает проблему утилизации шин, повышая экологическую устойчивость бетона. При замене мелкого заполнителя крошкой до 10% сохраняется высокая кислотостойкость и сопротивляемость хлоридной коррозии. Однако с увеличением доли резиновой крошки снижается прочность на сжатие, что ограничивает применение в несущих конструкциях [6].

Исследование прочностных характеристик бетонов с промышленными отходами не только способствует решению экологических и экономических задач, но и открывает новые возможности для развития строительной индустрии [7,8].

Материалы и методы

Для эффективного исследования влияния промышленных отходов на характеристики бетона применяется метод рационального планирования экспериментов с использованием метода латинских квадратов. Этот подход позволяет установить объективные закономерности зависимости механических свойств от различных факторов, сохраняя при этом минимальные затраты времени и ресурсов на проведение испытаний.

Инновационная особенность методики заключается в её способности построить высокоточную аппроксимирующую функцию нескольких переменных, охватывая всю область возможных сочетаний влияющих параметров при значительном снижении трудоёмкости. За счёт комбинирования метода рационального планирования и метода случайного баланса удаётся достичь оптимального баланса между точностью результатов и экономией ресурсов [9].

Экспериментальное исследование базируется на трёх ключевых

варьируемых параметрах: фактор «*m*» - марка цемента (М300, М400, М500), фактор «*a*» - вид промышленного отхода (отходы песчано-смоляных литейных форм, отсеvy газодинамического напыления алюминиевых порошков, резиновая крошка) и фактор «*n*» - процент замещения природного песка отходами (10%, 20%, 30%). Постоянными параметрами остаются размеры и марка щебня, фракция песка, геометрические параметры образцов.

Традиционный подход потребовал бы проведения 27 различных комбинаций экспериментов (3^3), что связано с существенными затратами на материалы, оборудование и трудовые ресурсы. Предложенная методика на основе комбинационных квадратов позволяет сократить количество опытов до 9, при этом равномерно охватывая область всех возможных сочетаний параметров (табл.1).

Таблица № 1

Схема планирования эксперимента для трех факторов

Марка цемента, <i>m</i>		300			400			500		
Вид отхода, <i>a</i>		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Замещение отходом, <i>n</i> , %	10	№1					№6		№8	
	20		№2		№4					№9
	30			№3		№5		№7		

Такое сокращение достигается за счёт расположения в каждой строке и столбце комбинационного квадрата только одного выбранного варианта, что обеспечивает при допустимом уровне точности значительное снижение стоимости и трудоёмкости исследований.

Результаты исследования

В таблице 2 представлены результаты проведённых экспериментальных исследований в соответствии с планом. В ячейки комбинационных квадратов занесены величины разрушающих нагрузок

(МПа) бетонных образцов на 28 суток в зависимости от сочетания значений учитываемых факторов.

Таблица № 2

Основные результаты экспериментальных исследований

Марка цемента, <i>m</i>		300			400			500		
Вид отхода, <i>a</i>		1	2	3	1	2	3	1	2	3
Замещение отходом, <i>n</i> , %	10	20,3	17,6	20,5	30,1	23,6	19,2	27,8	18,0	23,1
	20	17,5	15,4	18,8	27,1	20,4	18,9	26,1	16,5	21,4
	30	16,8	14,3	17,5	24,5	16,1	18,6	25,3	15,3	20,0

Необходимо выявить эмпирические зависимости, отражающие влияние рассматриваемых факторов на прочностные характеристики бетонных образцов. Исследование прочности проводилось с применением экспериментальных методов [10]. Полученные значения усредняются по каждому из основных факторов, после чего средние результаты отображаются на графике (рис. 1).

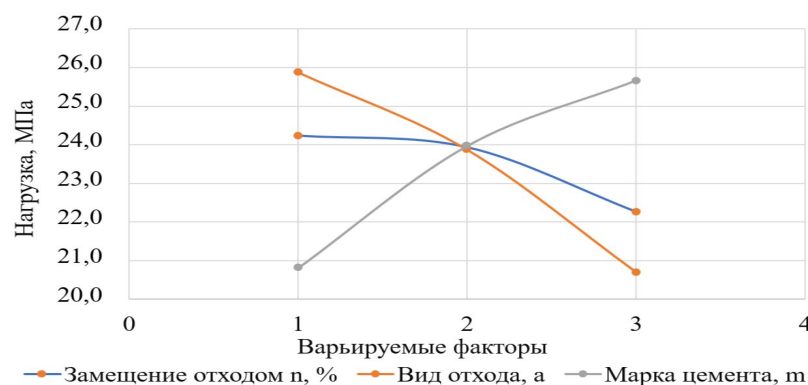


Рис. 1. – Теоретическая зависимость прочности бетона от основных факторов

Графики на рис. 1 демонстрируют уровень воздействия каждого из факторов на прочность исследуемых образцов. Самое значительное влияние оказывает марка цемента «*m*», за ней следует процентное соотношение замещения песка промышленным отходом «*n*», а наименьшее влияние

наблюдается у типа используемого промышленного отхода «а». В результате анализа получены эмпирические формулы, отражающие зависимость прочности бетона от каждого фактора (рис. 2–4):

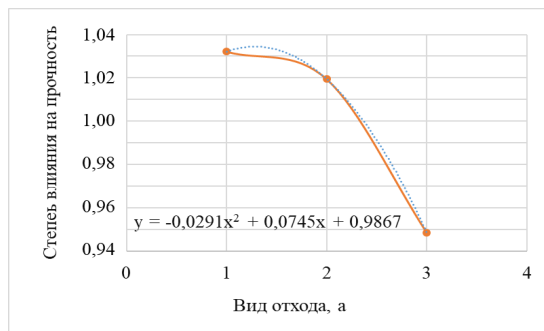


Рис. 2. – Диаграмма влияния вида отхода на прочность бетона

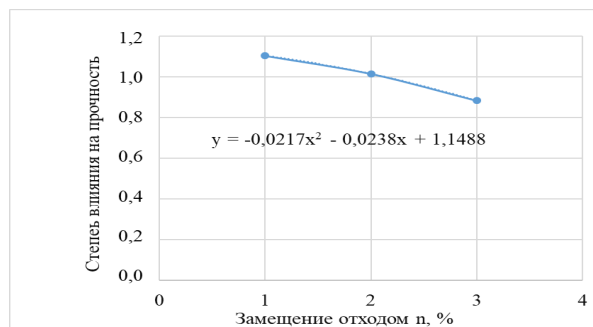


Рис. 3. – Диаграмма влияния % замещения отходом на прочность бетона

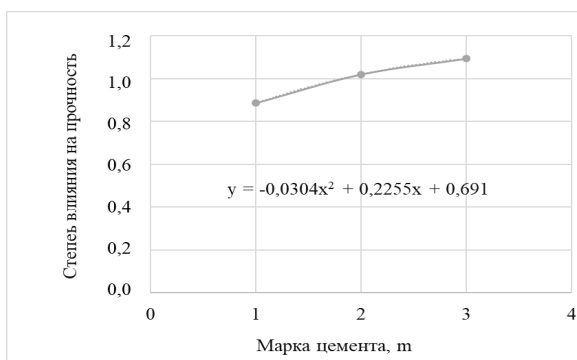


Рис. 4. – Диаграмма влияния марки цемента на прочность бетона

Таким образом, по найденным частным уравнениям каждой переменной получена эмпирическая зависимость (1), учитывающая влияние каждого конструктивного фактора на прочность бетона:

$$F = \Delta_{cp} \cdot f(a) \cdot f(n) \cdot f(m) \quad , \quad (1)$$

где $\Delta_{cp} = 20,4$ (МПа) – среднее значение прочности бетонных образцов.

Полученная многофакторная формула предназначена для определения прочности в зависимости от любого сочетания трех вариативных факторов.

Выводы

1. Исследование, проведенное в рамках данной работы, выявило значительный потенциал использования отходов литейной промышленности в производстве бетона, что открывает перспективы для создания экологичных и экономически эффективных строительных материалов.
2. Экспериментальные данные показали, что при замещении 20% природного песка ОПСЛФ с использованием портландцемента класса 32,5Н прочность на сжатие достигает 27,1 МПа через 28 суток, что на 10% выше, чем у эталонных образцов без добавок. Этот эффект обусловлен улучшением адгезии между компонентами смеси и заполнением пор, что способствует повышению плотности и прочности материала.
3. Добавление отсеков газодинамического напыления алюминиевых порошков приводит к снижению прочности бетона. При использовании данного отхода прочность снижается до 15,4 МПа, что на 43% ниже максимального значения для ОПСЛФ.
4. Резиновая крошка достигает прочности 21,4 МПа, но ограничена в использовании из-за сложного и длительного процесса переработки.
5. Таким образом, дальнейшие исследования целесообразно сосредоточить на оптимизации составов бетонов с использованием отходов песчано-смоляных литейных форм, так как они обеспечивают наилучшее сочетание прочностных характеристик, экологической эффективности и доступности. Это направление не только способствует решению проблемы утилизации отходов, но и позволяет создавать более прочные и устойчивые бетонные конструкции, что имеет важное значение для развития строительной отрасли в условиях ресурсных ограничений

Литература

1. Best J. Anthropogenic stresses on the world's big rivers. Nature Geoscience. 2019. №12 (1). Pp.7-21.
-

2. Шляхова Е. А., Холостова А. И. К вопросу повышения качества мелкозернистых бетонов на мелких песках // Инженерный вестник Дона. 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2110.

3. Саидов Д. Х., Умаров У. Х. Влияние минерально-химических добавок на коррозионностойкость цементных бетонов с применением промышленных отходов // Инженерный вестник Дона. 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1634.

4. Garcia G., Cabrera R., Rolon J., Pichardo R., Thomas C. Systematic review on the use of waste foundry sand as a partial replacement of natural sand in concrete. Construction and Building Materials. 2024. № 430. Pp. 254-263.

5. Abhishek Th., Saurav K. Mechanical properties and development of light weight concrete by using autoclaved aerated concrete (AAC) with aluminum powder. Materials Today: Proceedings. 2022. V. 56. № 6. Pp. 3734-3739.

6. Sanjaya B.G.V., Appuhamy J.M.R.S., Venkatesan S., Bandara W.M.K.R.T.W., Gravina R.J. Impact of recycled tire steel fibers on the mechanical performance of conventional and rubberized concrete: A comprehensive review. Structures. 2025. V. 80. 110137.

7. Рощина С. И., Гоньшаков Н. Г., Гоньшаков А. Г. Работа в двух направлениях монолитного железобетонного перекрытия со стальным профилированным настилом. Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 1. С. 46-47.

8. Гоньшаков А. Г., Гоньшаков Н. Г., Рощина С. И. Исследование напряженного состояния опорного диска облегченной конструкции, образованной на основе типовой железобетонной решетчатой. Научно-технический вестник Поволжья. 2012. № 5. С. 149-152.

9. Лисятников М. С., Тужилова М. В., Мясников Д. О., Терентьев К. М. Кубиковая прочность бетона с добавлением отходов песчано-смоляных литейных форм. Вестник Поволжского государственного технологического



университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 4(32). С. 18-29.

10. Протодяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования экспериментов / М.: изд-во «Наука». 1970. 76 с.

References

1. Best J. Nature Geoscience. 2019. №12 (1). Pp.7-21.
2. Shlyakhova E. A., Kholostova A. I. Inzhenernyj vestnik Dona 2013. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2110.
3. Saidov D. Kh., Umarov U. Kh. Inzhenernyj vestnik Dona 2013. № 2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1634.
4. Garcia G., Cabrera R., Rolon J., Pichardo R., Thomas C. Construction and Building Materials. 2024. № 430. Pp. 254-263.
5. Abhishek Th., Saurav K. Materials Today: Proceedings. 2022. V. 56. № 6. Pp. 3734-3739.
6. Sanjaya B.G.V., Appuhamy J.M.R.S., Venkatesan S., Bandara W.M.K.R.T.W., Gravina R.J. Structures. 2025. V. 80. 110137.
7. Roshchina S. I., Gon'shakov N. G., Gon'shakov A. G. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2009. № 1. Pp. 46-47.
8. Gon'shakov A. G., Gon'shakov N. G., Roshchina S. I. Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzh'ya. 2012. № 5. Pp. 149-152.
9. Lisiatnikov M. S., Tuzhilova M. V., Myasnikov D. O., Terent'yev K. M. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii. 2024. № 4(32). Pp. 18-29.
10. Protodyakonov M. M., Teder R. I. Metodika ratsional'nogo planirovaniya eksperimentov [The methodology of rational planning of experiments]. M.: izd-vo «Nauka». 1970. 76 p.

Дата поступления: 13.11.2025

Дата публикации: 25.12.2025