

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <https://naukovedenie.ru/>

Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/vol9-5.php>

URL статьи: <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf>

Статья опубликована 07.10.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Халюшев А.К., Прудников В.В., Стельмах С.А., Щербань Е.М., Нажуев М.П. Оценка эффективности комбинирования минеральных добавок в мелкозернистом бетоне // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №5 (2017) <https://naukovedenie.ru/PDF/25TVN517.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 691.32

Халюшев Александр Каюмович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Россия, Ростов-на-Дону¹
Доцент кафедры «Технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики»
Кандидат технических наук
E-mail: khaljushev@mail.ru

Прудников Владимир Викторович

ООО «Донской газобетон», Россия, Новочеркасск
Генеральный директор
E-mail: info@gazobeton-don.ru

Стельмах Сергей Анатольевич

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Россия, Ростов-на-Дону
Доцент кафедры «Технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики»
Кандидат технических наук
E-mail: sergej.stelmax@mail.ru

Щербань Евгений Михайлович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Россия, Ростов-на-Дону
Доцент кафедры «Технологии вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики»
Кандидат технических наук
E-mail: au-geen@mail.ru

Нажуев Мухума Пахрудинович

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Россия, Ростов-на-Дону
Магистрант
E-mail: nazhuev17@mail.ru

Оценка эффективности комбинирования минеральных добавок в мелкозернистом бетоне

Аннотация. В статье рассмотрены теоретические и практические аспекты использования различных промышленных отходов при получении многокомпонентных мелкозернистых бетонов. С использованием метода планирования эксперимента определена эффективность введения комбинированных минеральных добавок в мелкозернистый бетон. В данной работе оценивалось влияние трех дискретно меняющихся факторов А (содержание шлака), В (содержание наполнителя), С (вид наполнителя) на подвижность бетонной смеси и предел прочности при сжатии бетона. В качестве минеральных наполнителей применяли три

¹ 344000, ЮФО, Ростовская область, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

вида добавок: золу-унос, известняк и вулканический туф. Расчет и анализ результатов проведенных экспериментов показал, что факторы А и С оказывают существенное влияние на изменение подвижности мелкозернистой бетонной смеси Y_2 ($D_{расп}$ – диаметр расплыва, мм). Вместе с тем на выходной параметр Y_1 ($R_{сж}^{28}$ – предел прочности бетона при сжатии, МПа) значительное влияние оказывает фактор А.

Авторами проведена оценка эффективности комбинирования минеральных добавок с молотым шлаком Новочеркасской ГРЭС в мелкозернистом бетоне и определены оптимальные составы. Установлено, что наиболее эффективной добавкой к молотому шлаку является зола.

Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии введения минеральных добавок на физико-механические и технологические свойства цемента, что позволяет существенно снизить его расход в бетоне как наиболее дорогого материала.

Ключевые слова: мелкозернистый бетон; минеральная добавка; молотый доменный гранулированный шлак; зола-унос; золошлаковые отходы; пуццолановая активность; дисперсионный анализ; латинский квадрат

Анализ состояния и обоснование актуальности темы исследования, постановка задачи

В последние десятилетия во всем мире заметно усилилась тенденция к использованию различных промышленных отходов при получении многокомпонентных мелкозернистых бетонов [1]. Создание таких бетонов возможно только на основе многокомпонентных цементных систем, которые включают в себя портландцемент, химические модификаторы и тонкодисперсные активные минеральные компоненты. Отходами производства, как правило, являются гидравлические минеральные добавки, которые служат резервом для увеличения объемов выпуска бетонов преимущественно среднего класса. Эффективность их применения зависит как от состава бетона с заданным комплексом свойств, так и от способа их введения [2].

Известно, что минеральные добавки в бетон могут вводиться двумя принципиально различными способами: взамен части цемента (позволяет снизить его расход) и взамен части песка (увеличивается содержание дисперсной фазы, что повышает плотность бетона). Существуют также другие варианты, когда добавка частично заменяет цемент, а частично песок. При этом пуццолановая активность проявляется при любых способах введения добавок, но наибольший эффект проявляется во втором случае [3]. Это объясняется тем, что песок является относительно инертным материалом в отличие от минеральных добавок. Введенные в состав цементных бетонов, они не только участвуют в процессах гидратации цемента, но и выполняют структурообразующую роль на уровне физико-химического взаимодействия частиц бетона как композиционного материала [4].

Из отходов промышленности наибольшее распространение в качестве минеральных добавок получили высокодисперсные добавки-уплотнители (микрокремнезем, термоактивированный каолин, зола рисовой шелухи), которые являются более эффективными в сочетании с суперпластификаторами, так как повышают реакционную способность цемента и заполняют пустоты между его зернами, что способствует уплотнению структуры бетона. Однако эти материалы являются достаточно дефицитными и дорогостоящими и требуют проведения дополнительных процессов при их получении. Поэтому при производстве многокомпонентных вяжущих, как правило, используют добавки-разбавители (зола-унос тепловых электростанций (ТЭС), молотый доменный гранулированный шлак, молотый известняк), удельная поверхность которых приближается к цементу, что позволяет получать бетоны средней прочности, а также снизить себестоимость клинкера в портландцементе [5].

Согласно ГОСТ 31108-2016 «Цементы общестроительные. Технические условия» содержание смеси различных минеральных добавок регламентируется от 28 до 80 %, причем количество шлаковой составляющей (доменного шлака) может варьироваться в пределах от 18 до 40 %, а минеральной (пуццолана + зола унос) от 10 до 40 %. При этом в качестве пуццолановой добавки к золе-унос рекомендуется использовать добавки осадочного происхождения в количестве до 10 %, которые резко повышают водопотребность цементов.

При использовании добавок-разбавителей в портландцементе их действие на процессы структурообразования может быть различным. Пуццолановая активность этих добавок является недостаточно высокой вследствие наличия в их составе большого количества веществ в закристаллизованном состоянии или низкой степени дисперсности.

За годы деятельности Новочеркасской ГРЭС (государственной районной электростанции) скопилось огромное количество шлаков. По данным специалистов, площадей для складирования им хватит ещё на 2-3 года. Стоит отметить, что проблема утилизации и использования шлаковых отходов обсуждалась в 2011 году на совещании «Реализация экологической политики Новочеркасской ГРЭС. Утилизация золошлаков». Уже тогда были намечены основные направления по применению и переработке золошлаковых отходов Новочеркасской ГРЭС. Разработаны программы технических и организационных мероприятий по увеличению отгрузки золошлаковых материалов для нужд потребителей.

Во всём мире золошлаковые отходы угольных электростанций уже давно находят широкое применение в жилищном, дорожном и ландшафтном строительстве, в производстве строительных материалов, снижая их себестоимость минимум на 15-20 % [6].

В ранее проведенных исследованиях [7, 8] отмечалось, что при практически одинаковом химическом составе золы-уноса и шлака ТЭС, степень их кристалличности по результатам рентгенофазового анализа значительно отличается. Основные компоненты молотого шлака ТЭС находятся в рентгеноаморфном состоянии в отличие от золы, которая характеризуется наличием большого количества пиков различных соединений, представленных в основном в закристаллизованном состоянии.

Характерной особенностью композиционных цементов является более медленный темп набора прочности в ранние сроки твердения, что связано с достаточно большой долей замены клинкерной составляющей гранулированным шлаком (от 20 до 40 %). В свою очередь добавление золы-уноса, состоящей из большого количества остеклованных частиц сфероидальной формы, приводит к улучшению удобоукладываемости и к некоторому снижению водопотребности. Тем не менее, показатели прочности в ранние сроки твердения уменьшаются в сравнении с обычными портландцементными бетонами и начинают значительно возрастать по истечении 28 суток [9].

В качестве одной из наиболее перспективных минеральных добавок в этом направлении является известняк, который позволяет повысить раннюю прочность цементного камня, обладает положительным зарядом поверхности, легко размалывается и при добавлении его в портландцемент, располагаясь в пространстве между зернами и, играя роль смазки, улучшает при этом технологические свойства.

Следовательно, высокая пуццолановая активность молотого шлака ТЭС обуславливает целесообразность его комбинирования с минеральными добавками и позволяет разрабатывать новые составы композиционных вяжущих и бетонов на их основе, значительно расширяя номенклатуру и объемы выпускаемой продукции с более низкой себестоимостью и хорошими показателями качества. Особенно остро эта проблема стоит в мелкозернистых песчаных бетонах, которые отличаются от обычных бетонов высоким расходом цемента различного назначения.

Целью настоящей работы является оценка эффективности комбинирования минеральных добавок с молотым шлаком Новочеркасской ГРЭС в мелкозернистом бетоне.

Характеристика исходных материалов и методов исследований

Исходными компонентами для приготовления мелкозернистого песчаного бетона были приняты следующие материалы:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Себряковцемент (основные свойства которого приведены в таблице 1);
- шлак Новочеркасской ГРЭС;
- вулканический туф;
- известняк ООО «Жирновский щебеночный завод»;
- зола-унос Новочеркасской ГРЭС;
- отсев дробления гранитного щебня фракции 1,25-2,5 мм ОАО «Павловск неруд» Павловского ГОК (горно-обогатительного комбината);
- кварцевый песок Грушевского песчаного карьера.

Таблица 1

Физико-механические свойства портландцемента Себряковцемент

Тонкость помола, %	Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин.		Нормальная консистенция цементно-песчаного раствора, мм	Активность цемента*, МПа
		начало	конец		R _{сж}
не менее 85 %	24	135-160	260	110	31

*Активность цемента определяли после пропаривания по режиму 2 + 8 + 2 ч. при $t = 80 \pm 5$ °С (разработана авторами)

На прочность мелкозернистого бетона огромное влияние оказывают качественные характеристики песка: модуль крупности, содержание ПГЧ (пылевидных и глинистых частиц), межзерновая пустотность, насыпная плотность. При этом применение крупнозернистого песка в бетоне не рационально, поскольку приводит к перерасходу цемента из-за высокой межзерновой пустотности. В связи с этим в качестве мелкого заполнителя применяли песок Грушевского карьера ($M_{кр} = 1,4$; $\rho^H = 1410$ кг/м³; $\rho = 2550$ кг/м³; межзерновая пустотность $P_{мз} = 43$ %) и песок из отсевов дробления горных пород, которые предварительно отмучивали и высушивали при $t = 105-110$ °С. Оптимальное соотношение между песками (отсев дробл./грушевск. = 70 / 30; $\rho^H = 1545$ кг/м³) находили путем взвешивания и определения максимальной насыпной плотности, при этом смешивание производили в разных количественных пропорциях.

Мелкозернистый высокопрочный песчаный бетон М700 рассчитывали по методике, изложенной в [10]. В результате был определен базовый состав на 1 м³: цемент – 684 кг; песок – 1368 кг; $B/C = 0,4$. При проведении эксперимента в бетонную смесь вводили суперпластификатор С-3 в количестве 0,6 % от массы цемента. При введении суперпластификатора расход воды устанавливали экспериментально, путем проверки контрольного состава и определения диаметра расплыва на встряхивающем столике (ГОСТ 310.4). Найденное водоцементное отношение составляло $B/C = 0,32$. После определения показателя подвижности изготавливали образцы-кубы с ребром 5 см и выдерживали 28 суток в нормальных условиях.

Результаты экспериментов и обсуждение

Планирование эксперимента по оценке эффективности минеральных добавок, различных по типу и удельной поверхности, проводилось по схеме дисперсионного анализа с помощью латинского квадрата. Одним из достоинств использования алгоритма латинского квадрата является минимальное число опытов, которое определяется произведением уровней и исследуемых факторов [11]. В данной работе необходимо было оценить влияние трех дискретно меняющихся факторов А, В, С на подвижность бетонной смеси и предел прочности при сжатии мелкозернистого бетона:

- фактор А (строка плана) – содержание в бетонной смеси Новочеркасской ГРЭС шлака взамен части портландцемента, % – 20; 40; 60;
- фактор В (столбец плана) – содержание введенного наполнителя как дополнительного компонента к бетонной смеси взамен части портландцемента, % – 5; 10; 20;
- фактор С (элемент плана) – вид минеральной добавки (зола-унос; известняк; вулканический туф).

При планировании эксперимента в качестве исходных параметров были приняты следующие:

Y_1 – предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток нормального твердения, МПа;

Y_2 – расплыв конуса, определяемый на встряхивающем столике, мм.

План и результаты эксперимента приведены в таблице 2.

Таблица 2

План и результаты эксперимента трехуровневого латинского квадрата

Фактор А	Фактор В			Итоги по строкам А
	$b_1 - 5 \%$	$b_2 - 10 \%$	$b_3 - 15 \%$	
$a_1 - 20 \%$	c_1	c_2	c_3	$A_{11} = 192,9$ $A_{12} = 325$
	$y_{11} = 66,5$ $y_{12} = 112$	$y_{11} = 56,5$ $y_{12} = 108$	$y_{11} = 70$ $y_{12} = 105$	
$a_2 - 40 \%$	c_2	c_3	c_1	$A_{11} = 171,2$ $A_{12} = 358$
	$y_{11} = 55,4$ $y_{12} = 118$	$y_{11} = 58,4$ $y_{12} = 110$	$y_{11} = 57,4$ $y_{12} = 130$	
$a_3 - 60 \%$	c_3	c_1	c_2	$A_{11} = 97$ $A_{12} = 382$
	$y_{11} = 33,4$ $y_{12} = 115$	$y_{11} = 35,2$ $y_{12} = 138$	$y_{11} = 28,4$ $y_{12} = 129$	
Итоги по столбцам В	$B_{11} = 154,9$ $B_{12} = 345$	$B_{11} = 150,4$ $B_{12} = 356$	$B_{11} = 155,8$ $B_{12} = 364$	Общий итог: $G_1=461,1$ $G_2=1065$
Итоги по элементам С	$C_{11} = 158,7$ $C_{12} = 380$	$C_{11} = 140,6$ $C_{12} = 355$	$C_{11} = 161,8$ $C_{12} = 330$	

Разработана авторами

Расчет и анализ результатов (таблица 3) показал, что факторы А (содержание шлака) и С (вид наполнителя) оказывают существенное влияние на изменение подвижности мелкозернистой бетонной смеси Y_2 ($D_{расп}$ – диаметр расплыва, мм). Вместе с тем на выходной параметр Y_1 ($R_{сж}^{28}$ – предел прочности бетона при сжатии, МПа) значительное влияние оказывает фактор А (содержание шлака).

Критерием оптимального состава при оценке эффективности влияния минеральных добавок на молотый шлак с целью экономии портландцемента является получение бетона заданной марочной прочности. При этом получить одинаковую прочность бетона с применением минеральных добавок, которые имеют разный химический состав и удельную поверхность, очень трудно.

Таблица 3

Результаты дисперсионного анализа

Наименование показателя	Расчетная формула	№	Значение для параметра	
			$Y_1 (R^{28}_{сж})$	$Y_2 (D_{расп}, МПа)$
Сумма квадратов всех наблюдений	$S_1 = \sum_{i=1}^{p^2} (y_{ijkl})^2$	(1)	25432	127067
Сумма квадратов итогов по строкам – A_i	$S_2 = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^p A_i^2$	(2)	25309	126571
Сумма квадратов итогов по столбцам – B_j	$S_3 = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p B_j^2$	(3)	23629	126086
Сумма квадратов итогов по элементам – C_k	$S_4 = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p C_k^2$	(4)	23711	126442
Корректирующий член	$S_6 = \frac{1}{n^2} G^2$	(5)	23624	126025
Сумма квадратов для строки	$S_A = S_2 - S_6$	(6)	1685,9	546
Сумма квадратов для столбца	$S_B = S_3 - S_6$	(7)	5,5	61
Сумма квадратов для элемента квадрата	$S_C = S_4 - S_6$	(8)	87,5	417
Сумма квадратов общая	$S_{общ} = S_1 - S_6$	(9)	1808,5	1042
Сумма квадратов остаточная	$S_{ост} = S_{общ} - (S_A + S_B + S_C)$	(10)	29,6	18
Дисперсия фактора	$S_A^2 = \frac{S_A}{p-1}$	(11)	842,9	273
Дисперсия фактора	$S_B^2 = \frac{S_B}{p-1}$	(12)	2,75	30,5
Дисперсия фактора	$S_C^2 = \frac{S_C}{p-1}$	(13)	43,8	208,9
Ошибка опыта	$S_0^2 = \frac{S_{ост}}{(p-1)(p-2)}$	(14)	14,8	9
Расчетное значение критерия Фишера	$\frac{S_A^2}{S_0^2} = F_{pA}$	(15)	57	30,3
Расчетное значение критерия Фишера	$\frac{S_B^2}{S_0^2} = F_{pB}$	(16)	0,19	3,4
Расчетное значение критерия Фишера	$\frac{S_C^2}{S_0^2} = F_{pC}$	(17)	2,96	23,2
Табличное значение критерия Фишера	$F_T(f_a = 2, f_0 = 2, q = 0,05)$	(18)	19,0	

Разработана авторами

В этом случае предлагается [12] использовать удельную прочность R/U (где R – предел прочности бетона при сжатии; U – расход цемента), которая при прочих равных условиях ($B/U = const$) является функцией прочности бетона.

Сопоставление полученных результатов проведенных экспериментов позволило выделить следующие оптимальные составы (таблица 4).

Таблица 4

Оптимальные составы мелкозернистых бетонов

№ п/п	Содержание компонентов в смеси, %			Расход цемента, кг/м ³	Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток, МПа	Удельная прочность R/Ц
	Цемент	Мин. добавка.	Молотый шлак			
1	45	15 (с ₁)	40	308	57	1,86
2	30	10 (с ₁)	60	205	35	1,7
3	50	10 (с ₃)	40	342	58	1,7
4	25	15 (с ₂)	60	171	28	1,67
5	65	15 (с ₃)	20	445	70	1,57
6	55	5 (с ₂)	40	376	55	1,47

Разработана авторами

Минимальные показатели прочности М300, но более высокие значения подвижности показали составы, где максимальное количество минеральных добавок составляло более 60 %. Эффективность этих составов может быть улучшена за счет применения жестких бетонных смесей или высокоэффективных химических модификаторов.

Мелкозернистые песчаные бетоны, которые содержали в своем составе от 25 до 55 % (суммарно с учетом шлака) минеральных добавок соответствовали М400 и выше, причем наиболее эффективными добавками в этом случае являлись, исходя из результатов таблицы 4: зола Новочеркасской ГРЭС > вулканический туф > известняк.

Выводы

1. Проведена оценка эффективности комбинирования минеральных добавок с молотым шлаком Новочеркасской ГРЭС в мелкозернистом бетоне и определены оптимальные составы. Установлено, что наиболее эффективной добавкой к молотому шлаку является зола.
2. Полученные результаты свидетельствуют о положительном влиянии введения минеральных добавок на физико-механические и технологические свойства цемента, что позволяет существенно снизить его расход в бетоне как наиболее дорогого материала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кунцевич О. В., Махинин Б. В., Шангина Н. Н. Структура цементного камня с добавками суперпластификатора и микрокремнезема // Цемент. 1992. №6. С. 30-36.
2. Высоцкий С. А., Бруссер М. И., Смиронов В. П., Царик А. М. Оптимизация состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. 1990. №2. С. 7-9.
3. Зоткин А. Г. Микронаполняющий эффект минеральных добавок в бетоне // Бетон и железобетон. 1994. №3. С. 7-9.
4. Соломатов В. И., Кононова О. В. Особенности формирования свойств цементных композиций при различной дисперсности цементов и наполнителей // Строительство и архитектура. Сер. Изв. вузов. 1991. №8. С. 50-53.
5. Баженов Ю. М. Современная технология бетона // Технологии бетонов. 2005. №1. С. 6.
6. http://www.ruffnews.ru/novocherkassk/Shlakovye-othody-Novocherkasskoy-GRES-nekuda-budet-devat-uzhe-cherez-2-goda_25757.
7. Зайченко Н. М. Высокопрочные мелкозернистые бетоны с модифицированными минеральными добавками из золошлаковых отходов Угледорской ТЭС // СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА / Ежегодный научно-технический сборник. Донецк ПромстройНИИпроект, 2007. – С. 145-151.
8. Zaichenko N. M., Khalyushev A. K., Sakhoshko E. V. High-strength fine-grained concretes with modified mineral admixtures of fly ash and milled slag of power station // Proc. International Conf. "Alkali Activated Materials – Research, Production, Utilization". – Prague (Czech R.), 2007. – P. 745-756.
9. Гольдштейн Л. Я. Использование топливных зол и шлаков при производстве цемента [Текст] / Л. Я. Гольдштейн, Н. П. Штейерт. – Л.: СТРОЙИЗДАТ, 1977. – 152 с.: ил. – Библиогр.: С. 147-150.
10. Баженов Ю. М. Технология бетона. – М.: Высшая школа, 1987. – 415 с.
11. Бондарь И. Г., Статюха Г. А. Потяженко И. А. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии. – Киев: Вища школа, 1980. – 263 с.
12. Власов В. К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. 1993. №4. С. 10-12.

Khalyushev Aleksandr Kayumovich

Don state technical university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: khaljushev@mail.ru

Prudnikov Vladimir Viktorovich

Limited Liability Company «Donskoy gazobeton», Russia, Novocheerkassk
E-mail: info@gazobeton-don.ru

Stel'makh Sergey Anatol'evich

Don state technical university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: sergej.stelmax@mail.ru

Shcherban' Evgeniy Mikhaylovich

Don state technical university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: au-geen@mail.ru

Nazhuev Mukhuma Pakhrudinovich

Don state technical university, Russia, Rostov-on-Don
E-mail: nazhuev17@mail.ru

Estimation of efficiency of mineral additives combination in the fine-grained concrete

Abstract. The theoretical and practical aspects of the use of various industrial wastes in the preparation of multicomponent fine-grained concrete are considered in the article. Using the method of experiment planning, the efficiency of introducing combined mineral additives into fine-grained concrete was determined. In this paper, we evaluated the effect of three discretely varying factors A (slag content), B (filler content), C (filler type) on the mobility of the concrete mixture and the compressive strength of concrete. Three types of additives were used as mineral fillers: fly ash, limestone and volcanic tuff. Calculation and analysis of the results of the conducted experiments showed that factors A and C have a significant effect on the variation in mobility of a fine-grained concrete mixture Y2 (D_{spr} is the diameter of the spread, mm). At the same time, the output parameter Y1 (R_{str}^{28} is an ultimate strength concrete under compression, MPa) is significantly influenced by factor A.

The authors evaluated the effectiveness of combining mineral additives with ground slag Novocheerkasskaya SDPS in fine-grained concrete and determined the optimal composition. It was found that the most effective additive to the ground slag is ash.

The obtained results testify to the positive effect of the introduction of mineral additives on the physico-mechanical and technological properties of cement, which allows to significantly reduce its consumption in concrete as the most expensive material.

Keywords: fine-grained concrete; mineral additive; ground blast-furnace granulated slag; fly ash; ash-slag waste; pozzolanic activity; dispersion analysis; Latin square