

## Исследование параметров, влияющих на эффективность тепловой обработки самоуплотняющегося бетона с минеральными добавками

*Л.И. Касторных, Ю.С. Фоминых*

*Донской государственной технической университет, Ростов-на-Дону*

**Аннотация:** Исследованы параметры теплового воздействия на физико-механические характеристики самоуплотняющихся бетонов с добавкой золы-уноса Новочеркасской ГРЭС. Установлено, что более высокий уровень качества СУБ с добавкой золы-уноса достигается при низкотемпературных режимах тепловой обработки. Эффективность использования золы-уноса в самоуплотняющихся бетонных смесях проявляется в снижении водопотребности смеси и повышении прочности бетона после тепловой обработки при условии рациональной дозировки гиперпластификатора и минеральной добавки. Оптимальный режим тепловой обработки СУБ следует устанавливать по коэффициенту эффективности тепловой обработки.

**Ключевые слова:** самоуплотняющийся бетон, гиперпластификатор, минеральная добавка, прочность бетона, режим тепловой обработки, коэффициент эффективности тепловой обработки.

Эффективность производства сборных железобетонных изделий и конструкций в значительной степени зависит от продолжительности общего технологического цикла. Самым длительным процессом при производстве изделий является набор требуемой прочности бетона. Поэтому на практике применяются химический, физико-механический или теплофизический методы ускорения твердения бетона.

Задача ускорения твердения – создание таких условий твердения вяжущего, в результате которых бетон будет приобретать требуемые свойства в экономически целесообразный промежуток времени.

Наиболее эффективным способом интенсификации твердения бетона является повышение температуры. Включение тепловой обработки (ТО) в технологический процесс дает возможность значительно увеличить оборачиваемость форм, снизить металлоемкость производства, сократить длительность общего цикла производства.

На эффективность процесса ускоренного твердения бетона влияет ряд факторов. Первая группа – «внутренние» факторы – определяются

качеством и количеством применяемых материалов (вид и минералогический состав вяжущего, состав и характеристики бетона, размер и профиль формуемого изделия). Качество и количество материалов для производства конкретных изделий устанавливается, исходя из условий обеспечения проектных показателей назначения бетона.

Вторая группа – «внешние» факторы – параметры тепловлажностного воздействия на твердеющий бетон, которые можно и необходимо изменять, устанавливая рациональный режим ускоренного твердения.

Основным фактором, определяющим характер греющей среды, способ тепловлажностной обработки и его эффективность, является максимальная температура обогрева в период изотермического выдерживания изделий в тепловом агрегате.

Для бетонов тяжелых, мелкозернистых и легких, изготавливаемых по традиционным технологиям, расчетные режимы ТО установлены нормативным документом: СП 130.13330.2011 Производство сборных железобетонных конструкций и изделий (Актуализированная редакция СНиП 3.09.01-85). Для самоуплотняющихся бетонов (СУБ) нормативные режимы ТО не разработаны, поэтому исследования о влиянии основных технологических факторов на свойства бетона при температурном воздействии особенно актуальны.

Производство СУБ стало возможным благодаря появлению эффективных суперпластификаторов на основе поликарбоксилатов и полиакрилатов (гиперпластификаторов). Химические добавки нового поколения почти в два раза эффективнее традиционных суперпластификаторов, но при этом весьма чувствительны к химико-минералогическому составу цемента, наличию минеральных наполнителей, присутствию глинистых примесей в заполнителе. Поэтому в реальных производственных условиях необходимо проводить исследования по

---

определению вида и дозировки гиперпластификатора для конкретного цемента [1 – 4].

Использование тонкодисперсных минеральных добавок в составе самоуплотняющихся смесей способно решить ряд проблем, связанных с их нерасплаиваемостью и стабильностью. Дополняя тонкодисперсную часть, минеральные добавки оказывают водоудерживающий эффект и повышают связность бетонной смеси. Установлено, что введение в состав бетона минеральных наполнителей, являющихся отходами сжигания угля (золы, шлаки), технически эффективно, экономически выгодно и экологически оправдано [5]. Применение вторичного минерального сырья целесообразно не только для существенного сокращения расхода цемента в бетонах, повышения их долговечности, но и для улучшения экологической ситуации в промышленных районах страны [6 – 9].

Цель настоящих исследований – оценить влияние максимальной температуры и длительности тепловой обработки на свойства самоуплотняющихся бетонов с добавкой золы-уноса Новочеркасской ГРЭС.

Зола-уноса Новочеркасской ГРЭС, являясь кислым минеральным сырьем, может проявлять гидравлическую активность в цементных системах только после дополнительного домола до оптимальной удельной поверхности  $\sim 5000 \text{ см}^2/\text{г}$  и при повышении температуры [10]. Наряду с высокой дисперсностью, эффективность применения золы в самоуплотняющихся бетонных смесях определяется её рациональной дозировкой [11].

В исследованиях для приготовления бетонных смесей использованы следующие материалы:

– портландцемент бездобавочный марки ПЦ500-Д0 цементного завода «Пролетарий» по ГОСТ 10178: активность 51,1 МПа; нормальная густота

цементного теста 24,75%, удельная поверхность 3520 г/см<sup>2</sup>; коэффициент эффективности при тепловой обработке 0,79;

– портландцемент с минеральными добавками сульфатостойкий класса ЦЕМII-42,5Н-СС ОАО «Верхнебаканский цементный завод» по ГОСТ 22266: активность 50 МПа; нормальная густота цементного теста 27,5 %; удельная поверхность 4015 см<sup>2</sup>/г; коэффициент эффективности при тепловой обработке 0,77; содержание добавки (опока) – 10,2 %;

– песок кварцевый природный по ГОСТ 8736: модуль крупности 1,01, насыпная плотность 1330 кг/м<sup>3</sup>, пустотность 49,6 %; содержание пылевидных и глинистых частиц ПГЧ - 1,9 %;

– щебень дробленый из известняка фракции 5 – 10 мм по ГОСТ 8267: прочность 100 МПа; насыпная плотность 1420 кг/м<sup>3</sup>, пустотность 48,1 %, содержание пылевидных и глинистых частиц ПГЧ - 0,15 %;

– минеральная добавка – зола-уноса Новочеркасской ГРЭС – тонкодисперсный материал, образуемый в результате сжигания угля: влажность естественная 0,35 %; истинная плотность 2,57 г/см<sup>3</sup>; насыпная плотность 808 кг/м<sup>3</sup>; удельная поверхность после домола 5414 см<sup>2</sup>/г; потери при прокаливании 7,35 % по массе (таблица 1).

Таблица №1

Характеристика золы-уноса Новочеркасской ГРЭС

Химический состав, %										Месторождение топлива
<i>SiO<sub>2</sub></i>	<i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i>	<i>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO</i>	<i>CaO</i>	<i>CaO<sub>св</sub></i>	<i>MgO</i>	<i>SO<sub>3</sub></i>	<i>K<sub>2</sub>O</i>	<i>Na<sub>2</sub>O</i>	<i>n.n.n</i>	
50,4	18,5	9,8	4,7	-	1,2	1,1	3,6	3,4	7,35	Восточный Донбасс

Для регулирования характеристик бетонных смесей и бетонов использованы следующие суперпластификаторы:

– Реопласт ПКЭ 2101 (далее ПКЭ 2101) – гиперпластификатор на основе эфира поликарбоновых кислот;

– Реопласт ПКЭ 2105 (далее ПКЭ 2105) – гиперпластифицирующая добавка на основе полимеров поликарбоксилатных простых эфиров;

– МС Muraplast FK 63 (далее FK 63) – гиперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов, обладающий сильным разжижающим действием.

Для оценки влияния суперпластификаторов на растекаемость бетонных смесей и свойства бетонов приготовлены контрольные составы с номинальным расходом вяжущего  $450 \text{ кг/м}^3$  при условии получения равноподвижных смесей (таблицы 2, 3).

В составах на портландцементе с кремнеземсодержащей минеральной добавкой зола-уноса не использовалась (составы 1 – 4). В бетонные смеси, приготовленные на бездобавочном портландцементе, зола-уноса вводилась в количестве 10 % массы вяжущего (составы 6, 8, 10).

Таблица №2

Показатели конструктивности смесей на цементе класса ЦЕМII-42,5Н-СС

Состав	Расход материалов на $1 \text{ м}^3$ , кг						Осадка конуса, см	Средняя плотность смеси, $\text{кг/м}^3$	$\frac{\text{Ц}}{\text{В}}$	$\frac{\text{П}}{\text{П} + \text{Щ}}$
	Цемент	Вода	Песок	Щебень	ПКЭ 2101	ПКЭ 2105				
1	444	249	691	987	4,44	-	22,0	2375	1,78	0,41
2	454	210	705	1008	6,8	-	21,0	2385	2,16	0,41
3	457	213	710	1015	-	4,6	21,0	2400	2,14	0,41
4	466	206	720	1028	-	7,0	22,0	2425	2,26	0,41

Таблица №3

Показатели конструктивности смесей на цементе марки ПЦ500-Д0

Состав	Расход материалов на $1 \text{ м}^3$ , кг								Осадка конуса, см	Диаметр расплыва, см	$\frac{\text{Вяз}}{\text{В}}$	$\frac{\text{П}}{\text{П} + \text{Щ}}$
	Цемент	Зола	Вода	Песок	Щебень	ПКЭ 2101	ПКЭ 2105	FK-63				
5	429	-	248	669	1030	3,27	-	-	22,0	-	1,72	0,39
6	395	49	255	661	1017	3,0	-	-	25,0	-	1,74	0,39
7	434	-	244	676	1043	-	3,3	-	22,0	-	1,77	0,39
8	397	49	241	664	1021	-	3,0	-	23,5	-	1,85	0,39
9	380	-	222	660	1094	-	-	3,8	-	56,0	1,71	0,38
10	342	38	210	640	1190	-	-	3,8	-	57,0	1,90	0,35

В ходе исследований установлено, что добавки марки Реопласт: ПКЭ 2101 и ПКЭ 2105 не обеспечивают требуемой растекаемости для СУБ даже при увеличении дозировки до 1,5 % массы цемента. Это свидетельствует о том, что для получения самоуплотняющихся смесей отмеченные суперпластификаторы не обладают достаточной реологической активностью и совместимостью с исследованными цементами.

Суперпластификатор Muraplast FK-63 при дозировке 1 % проявляет высокую реологическую активность как с бездобавочным цементом, так и золоцементным вяжущим, обеспечивая высокую однородность смеси и позволяя получить самоуплотняющиеся смеси марки SF-1 (составы 9, 10).

При назначении режима ТО для СУБ учитывалось наличие пластифицирующих добавок на основе эфиров поликарбоксилатов, которые на начальных стадиях структурообразования тормозят процессы схватывания цемента и твердение бетона [12 – 14]. Поэтому для создания благоприятных условий формирования бездефектной структуры бетона перед подачей теплоносителя предусматривалось предварительное выдерживание, а скорость подъема температуры ограничивалась 12,5 °С/ч. Максимальная температура обогрева бетона принималась в интервале от 50 до 70 °С.

В качестве критерия для определения влияния параметров тепловлажностной обработки на прочность бетона рассчитан коэффициент эффективности тепловой обработки  $K_{ТО}$ :

$$K_{ТО} = (R_n^{28} - R_n^{28}) / R_n^{28} \quad (1)$$

где  $R_n^{28}$  – прочность бетона через 28 суток после пропаривания, МПа;

$R_n^{28}$  – прочность бетона через 28 суток нормального твердения, МПа.

Результаты испытания контрольных образцов-кубов на прочность при сжатии приведены в таблице 4. Изменение коэффициента эффективности ТО бетона составов 1 – 10 представлено на рис. 1.

---

Таблица №4

Физико-механические характеристики бетонов

Состав	Добавка	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Режим ТО, час °С	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут.			
				нормального твердения		после ТО	
				1	28	1	28
1	ПКЭ 2101	2325	(5)+4+6+4 70	12,8	45,6	30,25	45,6
2		2380		20,9	65,3	43,3	60,0
3	ПКЭ 2105	2390		17,1	57,0	40,5	57,5
4		2410		22,0	66,8	43,0	65,4
5	ПКЭ 2101	2335	(5)+3+7+4 50	10,1	37,1	18,4	40,2
6		2295		8,5	30,1	13,8	30,9
7	ПКЭ 2105	2385		9,8	37,0	18,5	38,5
8		2330		8,2	28,4	15,7	30,2
9	Muraplast	2350	(5)+3+7+4 50	10,2	31,6	19,8	31,9
10	FK-63	2390		12,1	38,5	25,2	38,8

Примечание – Режим ТО включает: предварительное выдерживание без подачи теплоносителя, продолжительность подъема температуры до максимальной, длительность изотермического обогрева и остывания бетона в лабораторной пропарочной камере.

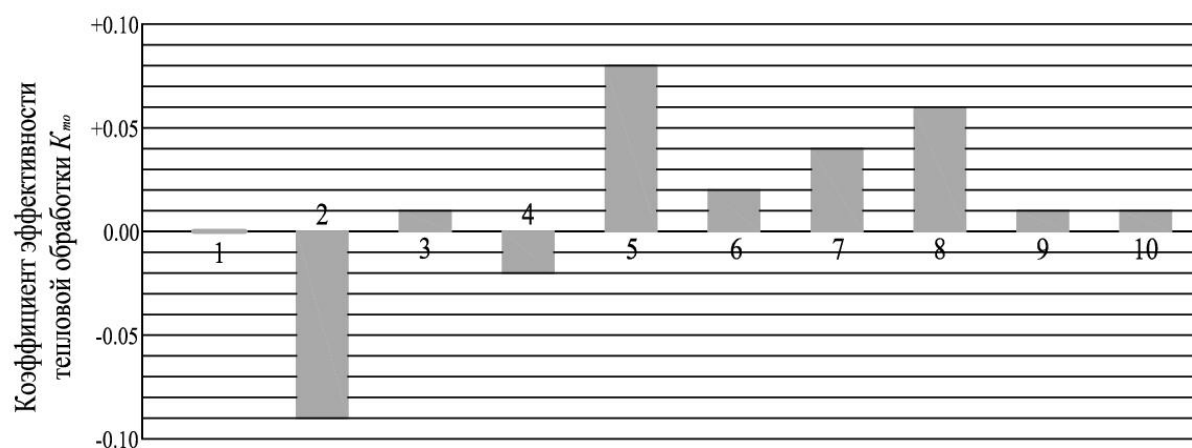


Рис. 1. – Коэффициент эффективности ТО бетона составов 1 – 10

Анализ полученных результатов свидетельствует о негативном влиянии высоких температур на структурно-механические характеристики бетона, содержащего гиперпластифицирующую добавку в большом количестве (составы 2, 4). Положительная величина  $K_{ТО}$  указывает на

рациональную дозировку гиперпластификатора и наличие химического взаимодействия активной минеральной добавки с продуктами гидратации цемента, способствующего увеличению потенциала вяжущего и прочности пропаренного бетона (составы 6, 8, 10).

В большей степени гидравлическая активность золы-уноса Новочеркасской ГРЭС при повышенной температуре проявилась в бетоне, содержащим гиперпластификатор Реопласт ПКЭ 2105 (состав 8). В СУБ, включающим добавку Muraplast FK-63 (состав 10), активность золы-уноса проявилась в снижении водопотребности смеси и повышении прочности бетона.

**Заключение.** Выполненные исследования показали, что вследствие развития при тепловом воздействии деструктивных явлений (формирования крупнопористой структуры твердеющего бетона) более высокий уровень качества СУБ с добавкой золы-уноса Новочеркасской ГРЭС достигается при низкотемпературных режимах ТО. Длительность теплового воздействия, зависящая от требуемой распалубочной прочности бетона, должна назначаться исходя из конкретных производственных условий.

В условиях действующего производства экономически целесообразный режим ТО при максимально допустимой температуре изотермического обогрева следует устанавливать по коэффициенту эффективности тепловой обработки и критерию минимальной себестоимости выпускаемой продукции.

### Литература

1. Несветаев Г.В. Технология самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 24–28.
2. Касторных Л.И., Деточенко И.А., Арина Е.С. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 2. Реологические характеристики бетонных смесей и



прочность самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2017. № 11. С. 22 – 27.

3. Рауткин А.В., Касторных Л.И. Выбор химических модификаторов для обеспечения растекаемости самоуплотняющихся бетонных смесей // Молодой исследователь Дона. 2017. №4(7). С. 118–126. URL: [mid-journal.ru/upload/iblock/5a8/20-rautkin-118\\_126.pdf](http://mid-journal.ru/upload/iblock/5a8/20-rautkin-118_126.pdf).

4. Харченко И.Я., Баженов Д.А. Эффективный самоуплотняющийся мелкозернистый бетон с компенсированной усадкой // Строительные материалы. 2018. № 5. С. 48–52.

5. Баженов Ю.М., Воронин В.В., Алимов Л.А., Бахрах А.М., Ларсен О.А., Соловьев В.Н., Нгуен Дык Винь Куанг Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 12 (111). С. 1385-1391.

6. Коровкин М.О., Гринцов Д.М., Ерошкина Н.А. Рациональное применение инертных минеральных добавок в технологии бетона // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4361/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4361/).

7. Касторных Л.И., Тароян А.Г., Усепян Л.М. Влияние отсева камнедробления и минерального наполнителя на характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов // Инженерный вестник Дона, 2017, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340).

8. Krauss H.-W., Budelmann H. Effects of fine-grained inert mineral additives on fresh and hardening concrete // International RILEM Conference on Material Science – MATSCI. Aachen, 2010. Vol. III. pp. 357-367.

9. Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Dittrich S., Neubauer J. Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash // Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42, № 10. pp. 1389-1400.

---

10. Овчинников Р.В., Авакян А.Г. Влияние различных методов активации на свойства кислых зол ТЭС как активной добавки в бетоны // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2013. № 6. С. 100-103.

11. Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. К.: Будивэльнык. 1991. 136 с.

12. Смирнова О. М. Зависимость прочности бетона с добавками на поликарбоксилатной основе от свойств портландцемента после низкотемпературной тепловлажностной обработки // Известия вузов. Строительство. 2012. №9. С. 20–27.

13. Петрова Т. М., Смирнова О. М. Пути получения бетона для сборных железобетонных конструкций с использованием низкотемпературной тепловлажностной обработки // Цемент и его применение. 2014. № 1-2. С. 188–190.

14. Коровкин М.О., Гринцов Д.М., Ерошкина Н.А. Исследование самоуплотняющегося бетона для производства железобетонных изделий на универсальном стенде с переставной опалубкой // Инженерный вестник Дона, 2018, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5071/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5071/).

### References

1. Nesvetaev G.V. Stroitel'nye Materialy. 2008. № 3. pp. 24–28.
2. Kastornykh L.I., Detochenko I.A., Arinina E.S. Stroitel'nye Materialy. 2017. № 11. pp. 22–27.
3. Rautkin A.V., Kastornykh L.I. Molodoj issledovatel' Dona. 2017. №4 (7). pp. 118–126. URL: [mid-journal.ru/upload/iblock/5a8/20-rautkin-118\\_126.pdf](http://mid-journal.ru/upload/iblock/5a8/20-rautkin-118_126.pdf).
4. Kharchenko I. Ya., Bazhenov D.A. Stroitel'nye Materialy. 2018. № 5. pp. 48–52.



5. Bazhenov Y.M., Voronin V.V., Alimov L.A., Bakhrakh A.M., Larsen O.A., Soloviev V.N., Nguyen Duc Vinh Quang. Vestnik MGSU. 2017. Vol. 12. Issue 12 (111). pp. 1385-1391.
6. Korovkin M.O., Hryntsov D.M., Eroshkina N.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2017, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4361/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4361/).
7. Kastornyh L.I., Taroyan A.G., Usepyan L.M. Inženernyj vestnik Dona (Rus). 2017. №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340/).
8. Krauss H.-W., Budelmann H. International RILEM Conference on Material Science – MATSCI. Aachen, 2010. Vol. III. pp. 357-367.
9. Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Dittrich S., Neubauer J. Cement and Concrete Research. 2012. Vol. 42, № 10. pp. 1389-1400.
10. Ovchinnikov R.V., Avakian A.G. Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. 2013. № 6. pp. 100-103.
11. Dvorkin L.I., Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Chudnovsky S.M. Cementnye betony s mineral'nymi napolnitelyami [Cement concretes with mineral fillers]. Kiev: Budivehl'nyk. 1991. 136 p.
12. Smirnova O.M. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2012. №9. pp. 20–27.
13. Petrova T.M., Smirnova O.M. Cement i ego primenenie. 2014. № 1-2. pp. 188–190.
14. Korovkin M.O., Hryntsov D.M., Eroshkina N.A. Inženernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №3. URL: [ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5071/](http://ivdon.ru/magazine/archive/n3y2018/5071/).