

КОМПОЗИЦИОННОЕ ВЯЖУЩЕЕ ДЛЯ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНОГО ПРОДУКТА ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Лазаренко О.В., Шпилевская Н.Л.

Введение. В современных условиях одним из направлений обеспечения высокого качества строительства является применение самоуплотняющегося бетона (СУБ). СУБ - бетон, свойства которого определяются безвибрационным уплотнением бетонной смеси, способной растекаться, полностью заполнять опалубочную полость и уплотняться под собственным весом [1]. При этом бетонная смесь заполняет пространство между арматурными стержнями с любой плотностью их расположения, закладными деталями, обеспечивая создание монолитных и сборных железобетонных конструкций высокой прочности, плотности, водонепроницаемости, морозостойкости.

Впервые самоуплотняющийся бетон начали применять в Японии в начале 90-х годов прошлого столетия с целью исключения ухудшения прочностных характеристик железобетонных конструкций, вызванных некачественным уплотнением бетонной смеси и продолжают до настоящего времени.

Благодаря уникальным свойствам самоуплотняющийся бетон начал активно применяться в Западной Европе. В 2003 году европейские организации ВІВМ, СЕМВUREAU, ЕRMCO, ЕFСА, ЕFNARC разработали документ «Европейские нормы для разжиженной самоуплотняющейся смеси», в котором регламентированы технические характеристики и потребительские качества конструкций, изготовленных из самоуплотняющегося бетона; установлены требования к исходным материалам и составу бетона, представлены рекомендации по его использованию [2].

В результате исследований в области самоуплотняющегося бетона в Беларуси появились ТКП 45-5.03-266 «Изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления» [1] и СТБ EN 206 «Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие» [3], в которых представлены требования к самоуплотняющемуся бетону, указания по назначению технологических режимов производства бетонных работ, методика проектирования состава бетона.

Основные компоненты самоуплотняющейся бетонной смеси: портландцемент, крупный и мелкий заполнители (расход щебня не превышает расход песка), вода затворения и высокоэффективные комплексные химические разжижители - гиперпластификаторы на основе полиакрилата и поликарбоксилата, обеспечивающий высокую подвижность СУБС.

Отличительными свойствами самоуплотняющейся бетонной смеси (СУБС) по сравнению с литыми являются отсутствие водоотделения и расслоения при ее высокой удобоукладываемости, удаление вовлеченного воздуха при самоуплотнении. Такой эффект достигается за счет ввода в бетонную смесь добавки-стабилизатора или тонкого инертного или активного наполнителя, сопоставимого по дисперсности с вяжущим. Многочисленные исследования показывают, что более полно обеспечивает заданные свойства СУБС введение тонкодисперсных минеральных наполнителей, на основе карбоната кальция и карбоната магния. Они имеют преимущества перед органическими добавками-стабилизаторами: кроме улучшения реологических свойств бетонных смесей, повышаются физико-механические и эксплуатационные характеристики бетона, в то время как стабилизаторы оказывают только стабилизирующее действие по водоотделению и расслоению СУБС. При этом приоритет отдается активным минеральным добавкам, изготавливаемым по безопасным технологиям с использованием местных сырьевых ресурсов, либо вторичным продуктам и техногенным отходам различных отраслей промышленности.

Рассматривая группу вторичных карбонатных продуктов различных предприятий Республики Беларусь выявлено, что значительный объем составляет минеральный шлам химической водоочистки (ШХВО) предприятий энергетического комплекса - теплоэнергоцентралей, который хранят в шламонакопителях, на промышленных свалках, закачивают в грунт. Проблема утилизации шлама в Беларуси до настоящего времени полностью не решена [4]. Имеющиеся исследования по использованию ШХВО показывают, что его применяют в строительной индустрии в качестве добавки в битумные композиции и самоуплотняющейся пес-

чаный бетон [5]; наполнителя в красочные составы и кладочные растворы; для укрепления грунтов; изготовления низкомарочных минеральных вяжущих [4]. Возможность применения ШХВО в качестве дисперсного наполнителя вяжущей композиции многокомпонентного самоуплотняющегося бетона изучена недостаточно.

Основная часть. Около половины всего объема шлама в республике образуется на предприятиях энергетического комплекса Витебской области, при этом основной объем шлама – 3 тыс. т. на Новополоцкой ТЭЦ. Шлам химической водоочистки имеет пастообразное состояние и содержит карбонат кальция (CaCO_3) в количестве 63,7 - 69,8 % и основной карбонат магния ($3\text{MgCO}\cdot\text{MgOH}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) – 6,4 - 10 % [6].

Анализ результатов научных исследований, связанных с использованием шлама водоочистки ТЭЦ, показал, что введение в состав кладочных растворов наполнителя (ШХВО) ТЭЦ способствуют увеличению объема прочных и устойчивых низкоосновных гидросиликатов кальция, в цементной матрице снижается концентрация напряжений [6].

В работе [7] исследовано влияние сухого шлама водоочистки при совместном вводе с поликарбоксилатным пластификатором Melflux на свойства цементного камня. Определены оптимальные дозировки шлама - 2,5-7,5 % - 0,6 %, при которых прочность цементного камня в возрасте 7 суток твердения на 12 % выше, чем у бездобавочного.

В исследовании [5] выявлено, что применение шлама водоочистки в качестве наполнителя в песчаный СУБ эффективно при совместном вводе 15% шлама и 5% микрокремнезема. В изобретении [8] описано использование шламовых отходов ТЭЦ без дополнительной обработки в качестве демпфирующей добавки в бетонную смесь взамен 2,5 - 3,0% кварцевого песка, при этом снизилась плотность и водоотделение бетонной смеси, себестоимость продукции, повысилась морозостойкость бетона.

Анализ результатов исследований по использованию в цементных композициях в качестве наполнителя карбонатосодержащего шлама химической водоочистки ТЭЦ показал, что он может быть использован при изготовлении самоуплотняющегося бетона.

При разработке состава самоуплотняющегося бетона были проведены исследования по определению влияния содержания ШХВО и гиперпластификатора на физико-механические свойства цементного теста и камня, основного составляющего тяжелого бетона.

Для проведения исследований применялись материалы: портландцемент марки ПЦ500-Д0 производства ОАО «Красносельскстройматериалы»; мелкий заполнитель кварцевый песок карьера «Боровое»: модуль крупности $M_{кр}$ - 2,5; крупный заполнитель гранитный щебень РУПП «Гранит» с размером зерен от 5 до 20 мм; дисперсный наполнитель карбонатосодержащий шлам химической водоочистки теплоэлектроцентралей [9]. Удельная поверхность $S_{уд.д.н.}$ - 1240 $\text{м}^2/\text{кг}$; истинная плотность $\rho_{дн}$ - 2510 $\text{кг}/\text{м}^3$, насыпная плотность 870 $\text{кг}/\text{м}^3$; химическая добавка – гиперпластификатор Стахемент – 2000 - М Ж30.

Для получения наполнителя шлам высушивали, мололи, просеивали. Максимальный размер частиц наполнителя составил 80 мкм. Определены нормальная густота цементного теста, прочность на сжатие цементного камня на образцах-кубиках размером 20 x 20 x 20 мм нормального твердения. Исследованы свойства 5 составов. 1 - без наполнителя, 2ч5 с вяжущей композицией: взамен части цемента вводили 10, 20, 30, 40 процентов наполнителя. Результаты исследований приведены на рисунках 1, 2, 3.



Рисунок 1 – Изменение нормальной густоты цементного теста в зависимости от расхода наполнителя

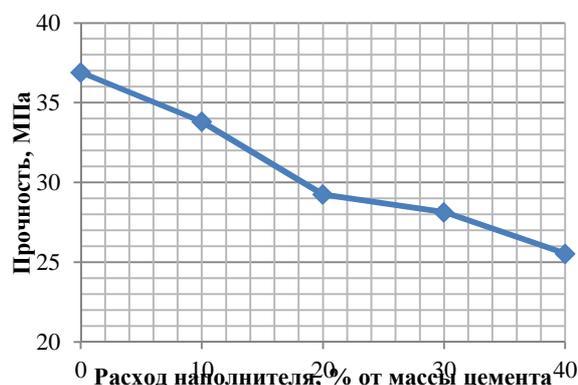


Рисунок 2 – Изменение прочности цементного камня в возрасте 7 суток в зависимости от расхода наполнителя

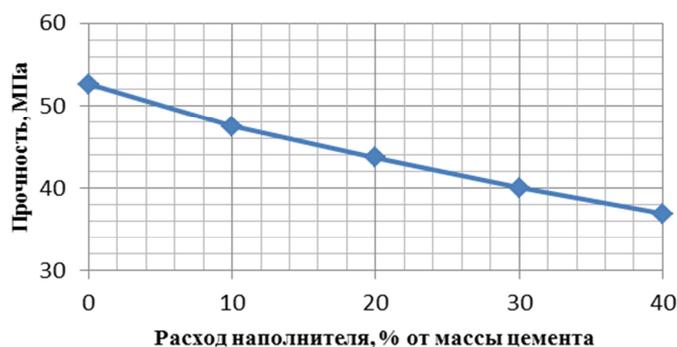


Рисунок 3 – Изменение прочности цементного камня в возрасте 28 суток в зависимости от расхода наполнителя

Анализ полученных результатов показал, что увеличение дозировки наполнителя приводит к росту показателя нормальной плотности вследствие увеличения удельной поверхности вяжущей композиции. Прочность цементного камня составов 2 ч 5, содержащих наполнитель в количестве 20 ч 40 % от массы цемента, в возрасте 28 суток снизилась на 11, 18, 24, 31%. Для дальнейших исследований был принят состав № 3 с вводом 20% ШХВО взамен части цемента в меньшей степени снижающий прочность цементного камня.

Исследования влияния совместного ввода ШХВО и гиперпластификатора Стахемент-2000-М Ж30 на кинетику набора прочности цементного камня проводили с дозировкой гиперпластификатора в пределах 0,25 ч 0,35%. Прочность на сжатие цементного камня оценивали на образцах-кубиках размером 20 х 20 х 20 мм нормального твердения, изготовленных из цементного теста с одинаковым относительным водосодержанием равным 1. Исследованы свойства 5 составов. 1. К - контрольный; 2. Ст 0,3 -0.3% гиперпластификатора; 3. Ст 0,25+Ш -0.25% гиперпластификатора; 4. Ст 0,3+Ш – гиперпластификатора; 5. Ст 0,35+Ш. Результаты исследований приведены на рисунке 4.

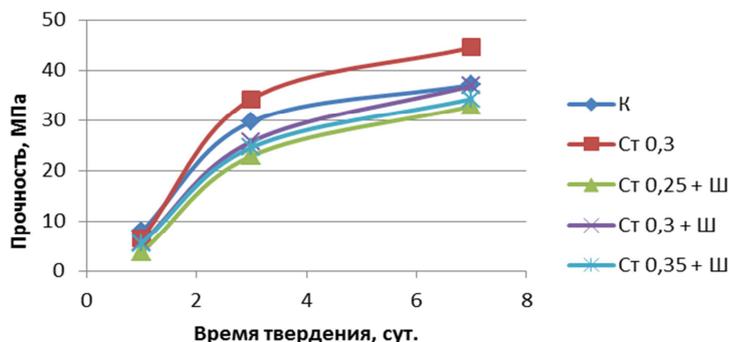


Рисунок 4 – Кинетика набора прочности цементного камня при введении ШХВО и гиперпластификатора

Полученные результаты позволили определить оптимальную дозировку гиперпластификатора - 0,3 %, процентное содержание ШХВО - 20% взамен части вводимого цемента.

Расчетное проектирование состава и свойств самоуплотняющихся бетонной смеси и бетона проводили согласно ТКП 45-5.03-266 [1]. Предварительно определены значения функции $\alpha_{дн}$, определяющей изменение прочности бетона с дисперсным наполнителем (ШХВО) по отношению к прочности контрольного состава без наполнителя. Расчет составов СУБ проводился в два этапа. На первом этапе рассчитаны три приближенных состава бетона с процентным содержанием шлама в вяжущей композиции - 20, 23, 25%, гиперпластификатора Стахемент – 2000 - М Ж30- 0,3 % от массы вяжущей композиции. На втором этапе по приближительным значениям содержания компонентов СУБ определены структурные характеристики бетона. Расчетные составы и свойства СУБС и СУБ представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Расчетные составы и свойства СУБС и СУБ

№ состава	Расход компонентов, кг/м ³					
	цемент	дисперсный наполнитель (ШХВО)	Стахемент – 2000 - М Ж30	вода	кварцевый песок	щебень
1- Ст 0,3+ 20% Ш	376	94	1,41	207	843	826
2- Ст 0,3+ 23% Ш	379	109	1,42	206	840	823
3- Ст 0,3+ 25% Ш	381	119	1,43	204	836	819
	Расчетное значение диаметра растекания конуса, РКр, см			Расчетная прочность на сжатие в возрасте 28 суток, $f_{ccube 28}$, МПа		
1	44			34,8		
2	46			32,1		
3	47			30,8		

Анализ полученных расчетных значений компонентов и структурных характеристик СУБ выявил, что полученные значения относительной характеристики пластических свойств теста по трем составам больше требуемого значения характеристики относительного водосодержания теста в пределе связности СУБС, установленного ТКП 45-5.03-266. Это потребовало увеличения содержания вяжущей композиции и, соответственно, уменьшения значения эффективного водовяжущего отношения бетона, корректирования расчетных составов самоуплотняющегося бетона. Откорректированные расчетные составы и свойства СУБС и СУБ представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Откорректированные расчетные составы и свойства СУБС и СУБ

№ состава	Расход компонентов, кг/м ³					
	цемент	дисперсный наполнитель (ШХВО)	Стахемент – 2000 - М Ж30	вода	кварцевый песок	щебень
1- Ст 0,3+ 20% Ш	400	100	1,50	220	842	826
2- Ст 0,3+ 23% Ш	389	115	1,51	219	840	823
3- Ст 0,3+ 25% Ш	382	125	1,52	216	836	819
	Расчетное значение диаметра растекания конуса, РКр, см			Расчетная прочность на сжатие в возрасте 28 суток, $f_{ccube 28}$, МПа		
1	64			42		
2	67			40		
3	69			39		

Для экспериментальной проверки расчетных составов и свойств СУБС и СУБ были изготовлены бетонные смеси составов 1ч3 (Таблица 2). Измерение величины подвижности бетонной смеси, РК, см, показало, что в соответствии с ТКП 45-5.03-266, марка первого состава СУБС по удобоукладываемости – Р - 2, второго и третьего- Р - 3, видимых расслоений бетонной смеси на конечной стадии растекания конуса не наблюдалось.

Прочность бетона на сжатие в определялась возрасте 7 и 28 суток нормального твердения и термовлажностной обработки при нормальном давлении по режиму: 2 - 3 – 8 – 2 ч.

Анализ полученных значений прочности показывает, что у трех составов СУБ достаточная для проектирования большинства конструктивных элементов (стены, колонны и др.) прочность на сжатие - класс бетона по прочности на сжатие $C^{30}/_{37}$.

Экспериментальные значения физико-механических свойств самоуплотняющихся бетонной смеси и бетона представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Экспериментальные значения физико-механических свойств самоуплотняющихся бетонной смеси и бетона

№ состава	Показатель растекания конуса РК, см	Прочность на сжатие, МПа (7 суток)		Прочность на сжатие, МПа (28 суток)
		после ТВО	НВУ	НВУ
1	64	25,7	30	44
2	67	23,6	28	41
3	69	23,4	25,8	37

Полученные значения удобоукладываемости СУБС и прочности СУБ сопоставимы с результатами других исследований: с применением в качестве наполнителя тонкодисперсного доломита [10], молотого известняка [11], мелкоизмельченного карбоната кальция - Belocard [12] (таблица 4, рисунок 5).

Таблица 4 – Сопоставимость полученных свойств СУБС и СУБ с данными других исследований

Расход компонентов, кг/м ³	По данным Magarotto [17]	По данным И.Пайерс [16]	По данным Котова [15]	Полученные авторами
Цемент	395	390	420	382
Молотый известняк	118	-	-	-
Наполнитель Belocard	-	110	-	-
Тонкодисперсный доломит	-	-	140	-
ШХВО	-	-	-	125
Вода	197	200	242	216
Песок	914	910	750	836
Щебень	748	762	740	819
Суперпластификатор	7.1	7.3	-	-
Гиперпластификатор	-	-	1,68	1,52
Водоцементное отношение	0,5	0,5	0,58	0,57
Растекание конуса, см	66	73	59	69
Прочность на сжатие в возрасте 28 суток, МПа	32	31	39,9	37

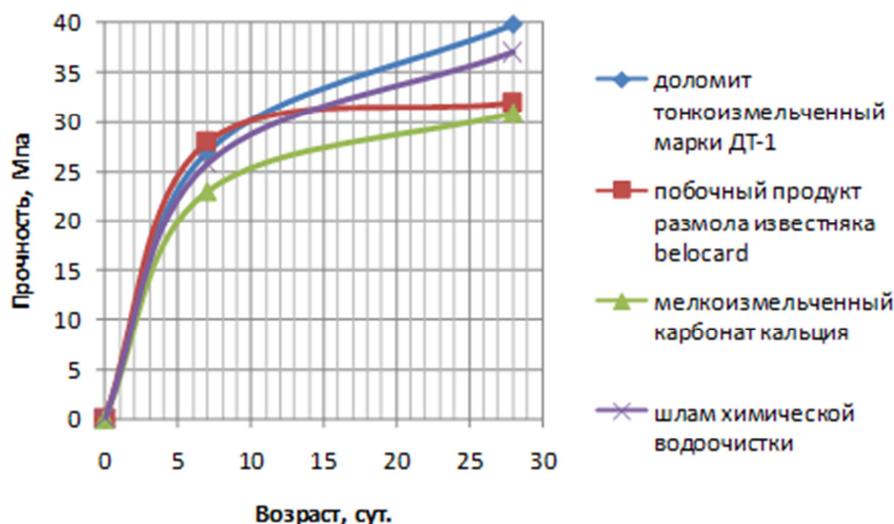


Рисунок 5 – Прочность СУБ с использованием различных активных карбонатосодержащих наполнителей

Выводы. Показано, что шлам химической водоочистки (ШХВО) - вторичный продукт ТЭЦ, может эффективно применяться в качестве наполнителя композиционного вяжущего самоуплотняющегося бетона при совместном вводе с гиперпластификатором. В результате расчетно-экспериментального проектирования состава СУБС получены составы с марки бетонной смеси по удобоукладываемости P - 2, P - 3, рекомендуемые для применения при возведении большинства строительных конструкций от слабо до густо армированных, с классом бетона по прочности на сжатие C30/37. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании составов СУБ не только для объектов промышленного и гражданского строительства но, и при дальнейшем выполнении исследований в данной области технологии бетонов, в дорожном строительстве.

Список источников

1. Бетонные и железобетонные изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления. ТКП 45-5.03-266-2012. – Введ. 20.08.12. - Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2013. – 28 с.
2. Европейский нормативный документ по самоуплотняющемуся бетону: DAfStb-RichtlinieSelbsverdichtenderBeton (SVB-Richtlinie). Ausgabe November 2003.
3. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие: СТБ EN 206-2016. - Введ. 29.12.2016. – Минск: Госстандарт, – 2016. – 108с.
4. Бакатович, А.А. Кладочные растворы с пластифицирующей добавкой на основе шлама водоочистки: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / А.А. Бакатович. – Новополоцк, 2002. – 157 с.
5. Авксентьев, В.И. Шлам химической водоочистки - эффективный наполнитель в самоуплотняющихся песчаных бетонах / Авксентьев В.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г. // Известия КГАСУ.-2015. – № 1.- С. 119-126.
6. Вишнякова, Ю.В. Строительные растворы с карбонатосодержащим наполнителем из вторичного продукта водоподготовки: дисс. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Ю.В.Вишнякова. – Новополоцк, 2014. – 166 с.
7. Авксентьев, В.И. Влияние шлама химической водоочистки в комплексе с суперпластификатором на физико-механические свойства цементного камня /Авксентьев В.И., Морозов Н.М., Боровских И.В., Хозин В.Г.// Известия КГАСУ.-2014.-№ 4.- С. 249-254.
8. Бетонная смесь: патент № 2258052. Чупшев В. Б.. [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа: <http://bd.patent.su/2258000-2258999/pat/servlet/servletd2f6.html>- Дата доступа: 12.10.2015.
9. Наполнитель карбонатосодержащий. Технические условия. ТУ ВУ 300220696.050-2010. – Введ. 04.03.2014.- Минск: Минстройархитектуры Респ. Беларусь: РУП «Стройтехнорм», 2014. – 12 с.
10. Котов, Д.С. Физико-механические свойства тяжелого самоуплотняющегося бетона: Автореферат дисс... канд. техн. наук: 05.23.05. – Минск, 2013. - 18 с.
11. Пайерс, И. Самоуплотняющийся бетон с мелкоизмельченным карбонатом кальция / И. Пайерс, Х. Барбара, Б. Барраган, Г. Рамос//CPI – Международное бетонное производство.- 2012. – № 1. – С. 34-38.
12. Magarotto, R. Innovative Admixtures: A Key component for a Sustainable Concrete Industry/R. Magarotto, Roncero J//CPI - Concrete Plant International. – 2008. – № 4. – P.72-76.