

# Строительные материалы и изделия

УДК 691

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЛЕГКИХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ

*Л.И. Касторных, Н.А. Сеницина*

**Установлена возможность получения легких конструкционных керамзитобетонных из самоуплотняющихся смесей. Выявлен ряд проблем по обеспечению реологической стабильности смесей и ускоренному твердению легкого бетона в условиях высоких температур.**

*Ключевые слова: самоуплотняющаяся смесь, керамзитовая смесь, реологическая стабильность, керамзитобетон, коэффициент конструктивного качества, параметр качества тепловой обработки.*

Возведение конструкций и производство сборных железобетонных изделий из легких бетонов является одним из направлений повышения эффективности строительства зданий и сооружений.

Во-первых, изделия и конструкции из легкого бетона имеют пониженную плотность по сравнению с тяжелым бетоном, следовательно, нагрузка возводимого здания на фундамент снижается. При возведении фундамента это позволяет сокращать расход арматуры, использовать бетон меньшей прочности.

Во-вторых, легкобетонные изделия имеют низкую теплопроводность, что дает возможность применять их в качестве ограждающих конструкций.

В-третьих, легкие пористые заполнители обладают вакуумирующим действием, благодаря которому образуется более плотный цементный камень, чем в равнопрочном тяжелом бетоне, и создаются оптимальные условия для гидратации цементного вяжущего.

Значительный вклад в развитие теории и технологии легкого бетона внесли такие исследователи как В.Г. Довжик, Б.Г. Скрамгаев, И.Н. Ахвердов, А.И. Ваганов, Н.П. Блещик и др.

Большинство исследований и разработанных рекомендаций предусматривают подбор легких бетонов из жестких и малоподвижных смесей (марки по удобоукладываемости до П2) [1, 2]. Исходя из этого, целесообразно исследование свойств легких самоуплотняющихся бетонов (ЛСУБ) и оценка их энергетической эффективности по сравнению с тяжелыми бетонами.

Появление самоуплотняющихся бетонов неразрывно связано с созданием профессором Х. Окамура нового типа добавок на базе полиакрилата и поликарбоксилата. Среди большого числа определений СУБ мы выделили формулировку, данную В. Мещериним, согласно которой СУБ (Self-compacting concrete) называют бетоны, которые без дополнительного уплотнения, лишь под

действием силы тяжести, способны течь, заполнять форму и пространство между арматурой, вытесняя воздух, не обнаруживая при этом седиментации и сегрегации [4].

СУБ имеет ряд преимуществ по сравнению с обычным бетоном:

- обладает уникальной реологией (позволяет исключить дефекты, связанные с недостаточным уплотнением, получить гладкую наружную поверхность, которая в точности повторяет форму и поверхность опалубки; имеет возможность создания любой геометрии конструкции);

- снижает трудоемкость и продолжительность работ по бетонированию;

- устраняет шум и вибрацию, негативно воздействующую на персонал и проживающих рядом со строительной площадкой людей.

В России, в частности, в Ростове-на-Дону, СУБ (как легкие, так и тяжелые) пока не получили широкого применения. Это объясняется и отсутствием нормативной базы, и недостаточно высокой культурой производства на строительных площадках – строители попросту боятся осваивать новый материал.

В настоящей работе была предпринята попытка получения ЛСУБ на основе керамзитовой смеси.

Для проведения исследований использованы следующие материалы:

- поргланцемент ОАО «Новоросцемент» завода «Пролетарий» марки ПЦ 500-Д0 по ГОСТ 10178-85 (активность цемента 51,2 МПа);

- гиперразжижитель Sika ViskoCrete 20 HE (компания Sika);

- гиперпластификатор Muraplast FK 63 (компания MC Bauchemie);

- комплексная добавка с эффектом ускорения твердения Rapid 680 (компания MC Bauchemie);

- песок кварцевый (модуль крупности  $M_k = 1,78$ );

## Строительные материалы и изделия

– керамзит щебнеподобный фр. 5–10 мм, полученный путем дробления керамзитового гравия (марка по средней плотности D500, марка по прочности П75, плотность в цементном тесте  $\rho_{к.ц.т} = 1,1$  кг/л);

– керамзитовая смесь фр. 0–10 мм – отход дробления керамзитового гравия ОАО «КПП Ипатьевский завод» (марка по средней плотности D700, марка по прочности П75, плотность в цементном тесте  $\rho_{к.ц.т} = 1,15$  кг/л). Зерновой состав смеси представлен в табл. 1.

Таблица 1  
Зерновой состав керамзитовой смеси

Номер сита, мм	Остаток, кг	Остаток, %
10,0	0,04	4
5,0	0,32	32
2,5	0,24	24
1,25	0,10	10
0,63	0,09	9
0,315	0,08	8
0,16	0,065	6,5
Поддон	0,065	6,5

В ходе эксперимента были приготовлены равноподвижные керамзитобетонные смеси марки SF-1 (диаметр расплыва смеси 55–65 см) с различным содержанием пористого заполнителя и плотного песка и различными добавками. Растекаемость керамзитобетонных смесей определена по методике [5] на установке, представленной на рисунке.

Применение керамзитовой смеси фр. 0–10 мм продиктовано необходимостью использования отхода фракционирования пористых заполнителей для получения легких бетонов. Предполагалось, что керамзитовая смесь, в состав которой входят зерна крупной, мелкой и пылевидной фракций, будет способствовать получению стабильных нерасслаиваемых керамзитобетонных смесей.



Конус Абрамса с блокировочным кольцом для определения растекаемости смеси

Исследованиями, проведенными ранее [3, 6], установлено, что для получения самоуплотняю-

щихся бетонных смесей максимальная крупность зерен заполнителя не должна превышать 10 мм, поэтому в исследованиях использовался щебнеподобный керамзит фр. 5–10 мм. Выбор добавок гиперразжижителей также продиктован необходимостью получения самоуплотняющихся смесей.

В ходе эксперимента часть керамзита фр. 5–10 мм замещалась керамзитовой смесью фр. 0–10, вплоть до полной замены.

Показатели конструктивности исследованных самоуплотняющихся смесей с добавкой гиперразжижителя Sika ViskoCrete 20HE приведены в табл. 2, с добавками Muraplast FK 63 и Rapid 680 – в табл. 3.

Для определения физико-механических характеристик бетона из бетонных смесей были изготовлены образцы-кубы с размером ребра 10,0 см.

Образцы бетона твердели как в нормальных условиях, так и в условиях тепловой обработки в лабораторной пропарочной камере по 2 режимам:

$$\tau_1 = 18((6)+3+6+3) \text{ ч при } t_{из} = 80 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\tau_2 = 20((8)+4+5+3) \text{ ч при } t_{из} = 70 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Физико-механические характеристики керамзитобетонов с добавкой марки Sika приведены в табл. 4, с добавками марки MC Bauchemie – в табл. 5.

Для определения влияния параметров тепло-влажностной обработки на прочность легкого бетона рассчитан параметр качества тепловой обработки:

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

где  $R_n^{28}$  – прочность бетона после пропаривания в возрасте 28 суток;  $R_n^{28}$  – прочность бетона нормального твердения в возрасте 28 суток.

Результаты экспериментов по созданию ЛСУБ выявили ряд проблем, которые проявляются, прежде всего, на этапе обеспечения реологической стабильности легкобетонной самоуплотняющейся смеси.

При использовании щебнеподобного керамзита фр. 5–10 мм (при объемной концентрации 0,45–0,55) и плотного песка получают стабильные смеси плотностью 1700–1900 кг/м<sup>3</sup> (составы 1S, 2S и 2M).

Введение взамен части керамзита и плотного песка керамзитовой смеси фр. 0–10 мм приводит к снижению средней плотности смесей, однако при полной замене плотного песка пористой смесью наблюдается всплытие зерен керамзита и расслоение смеси (составы 6S, 7S и 1M). Поэтому можно сделать вывод, что получение реологически стабильных ЛСУБ без использования плотного песка невозможно.

Известно, что прочность и плотность керамзитобетона, получаемого из жестких и малоподвижных смесей, зависит от объемной концентрации керамзита и расхода цемента [1, 2]. При проектировании состава легкого самоуплотняющегося бетона этих факторов недостаточно. Для обеспечения стабильности свойств легкобетонной смеси потребуются ограничения по содержанию плотного мелкого заполнителя и добавки гиперразжижителя, а для получения

Таблица 2

## Показатели конструктивности керамзитобетонных смесей с добавкой марки Sika

Состав	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> смеси, кг						Диаметр распылява, см	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Ц/В	Объем цементного теста, л	Объемная концентрация керамзита
	Керамзит фр. 5-10 мм	Керамзитовая смесь	Цемент	Вода	Песок кварцевый	Добавка ViskoCrete 20HE					
1S	586	–	467	243	467	9,4	55,0	1770	2,00	385	0,53
2S	507	–	507	231	633	10,1	62,0	1890	2,19	394	0,46
3S	448	112	448	224	448	9,0	55,0	1690	2,00	368	0,44
4S	393	165	449	231	449	9,0	55,0	1700	1,94	376	0,41
5S	274	219	438	243	438	8,8	55,0	1620	1,80	384	0,32
6S	367	327	417	233	–	8,4	32,0	1355	1,79	367	0,44
7S	–	758	473	270	–	9,4	34,0	1510	1,75	422	0,24

Примечание. 6S, 7S – реологически нестабильные смеси (расслоение)

Таблица 3

## Показатели конструктивности керамзитобетонных смесей с добавками марки MC Bauchemie

Состав	Расход материала на 1 м <sup>3</sup> смеси, кг							Диаметр распылява, см	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Ц/В	Объем цементного теста, л	Объемная концентрация керамзита
	Керамзит фр. 5-10 мм	Керамзитовая смесь	Цемент	Вода	Песок кварцевый	Добавка						
						Muraplast FK-63	Rapid-680					
1M	657	–	438	243	383	4,4	4,4	53,0	1728	1,80	384	0,60
2M	596	–	434	225	434	4,3	4,3	55,0	1698	1,93	365	0,54
3M	509	57	453	249	453	4,5	4,5	57,0	1730	1,82	395	0,48
4M	446	112	446	240	446	4,5	4,5	57,0	1700	1,86	384	0,44

Примечание. 1M – реологически нестабильная смесь (расслоение).

Таблица 4

## Физико-механические характеристики керамзитобетонов с добавкой марки Sika

Состав	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сут.					ККК	Режим ТВО, ч/°С	ПК <sub>т0</sub>
		нормального твердения			после ТВО				
		1	2	28	1	28			
1S	1735	–	23,6	34,1	27,6	29,3	0,197	$\frac{(8)+4+5+3}{70}$	– 0,16
2S	1760	1,4	–	43,0	21,9	32,0	0,244	$\frac{(6)+3+6+4}{80}$	– 0,34
3S	1650	–	21,2	34,8	21,6	30,1	0,211	$\frac{(8)+4+5+3}{70}$	– 0,16
4S	1670	4,4	–	38,6	21,1	26,6	0,231	$\frac{(6)+3+6+4}{80}$	– 0,45
5S	1485	2,3	–	28,3	16,3	21,0	0,191		– 0,35
6S	1330	1,7	10,9	17,2	6,3	17,7	0,129		+ 0,03
7S	1450	5,5	–	27,4	22,6	28,5	0,189		+ 0,04

Примечание. ККК – коэффициент конструктивного качества, определенный как отношение прочности бетона к его плотности.

Физико-механические характеристики керамзитобетонов с добавками марки MC Bauchemie

Состав	Средняя плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие, МПа, в возрасте, сут.					ККК	Режим ТВО, ч/°С	ПК <sub>ТО</sub>
		нормального твердения			после ТВО				
		1	2	28	1	28			
1М	1562	3,3	–	21,2	9,9	26,3	0,136	(8)+4+5+3 70	+ 0,19
2М	1668	4,7	–	35,1	23,9	31,9	0,210		– 0,10
3М	1646	–	23,0	35,0	26,1	32,0	0,213		– 0,09
4М	1658	–	25,8	37,1	25,2	32,8	0,224		– 0,13

Примечание. ККК – коэффициент конструктивного качества, определенный как отношение прочности бетона к его плотности.

требуемой плотности и прочности керамзитобетона – по объему цементного теста и расходу пористого заполнителя.

Для легкого бетона важным параметром является коэффициент конструктивного качества ККК, свидетельствующий о рациональном составе бетона [7, 8]. При оптимальном соотношении масс плотного мелкого и пористого заполнителей, при рациональном объеме цементного теста могут быть получены легкие самоуплотняющиеся бетоны высокой прочности с плотностью 1600–1700 кг/м<sup>3</sup> (составы 2S, 4S и 4М).

В процессе исследований установлено негативное влияние высоких температур на структурообразование керамзитобетона из самоуплотняющихся смесей. Для устранения отрицательных воздействий от расширения жидкой фазы необходимо предусматривать продолжительное выдерживание до подачи теплоносителя, а также ограничивать максимальную температуру обогрева бетона. Кинетика твердения ЛСУБ также отличается от характера твердения тяжелых бетонов. Для ЛСУБ отмечен медленный темп набора прочности в течение первых суток, но уже через двое суток твердения в нормальных условиях бетон набирает прочность, такую же, как бетон сразу после пропаривания.

Выполненными исследованиями установлена принципиальная возможность получения легких конструктивных керамзитобетонов из самоуплотняющихся смесей. В то же время выявлен ряд проблем по обеспечению реологической стабильности смесей и ускоренному твердению ЛСУБ в условиях высоких температур.

### Литература

1. Ваганов, А.И. Керамзитобетон / А.И. Ваганов. – М.: Госстройиздат, 1976. – 136 с.
2. Горин, В.М. Эффективный керамзитобетон в России / В.М. Горин, С.А. Токарева, М.К. Кабанова // Строительные материалы. – 2009. – № 9. – С. 54–57.
3. Блецик, Н.П. Технологические и физико-механические свойства керамзитобетона плотной структуры, в том числе изготовленного из высокоподвижных бетонных смесей / Н.П. Блецик, Н.С. Протьюко // Проблемы современного бетона и железобетона: материалы III Международного симпозиума. Т. 2: Технология бетона. – Минск, 2011. – С. 114–145.
4. Мещерин, В. Самоуплотняющийся бетон: основы технологии и сферы применения / В. Мещерин // ICCX Санкт-Петербург. – 2006. – С. 48–51.
5. Болотских, О. Европейские методы физико-механических испытаний бетона. Первое издание / О. Болотских. – Харьков: TESTING, 2010. – С. 72–80.
6. Бычков, М.В. Состав, структура и свойства легких конструктивных самоуплотняющихся туфобетонов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М.В. Бычков. – Ростов-на-Дону, 2013.
7. Несветаев, Г.В. Бетоны / Г.В. Несветаев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2011. – 381 с.
8. Давидюк, А.Н. Эффективные бетоны для современного высотного строительства / А.Н. Давидюк, Г.В. Несветаев. – М.: ООО НИПКЦ Восход – А, 2010. – 148 с.

**Касторных Любовь Ивановна**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики», Ростовский государственный строительный университет (Ростов), likas9@mail.ru.

**Синицина Надежда Андреевна**, магистр кафедры «Технология вяжущих веществ, бетонов и строительной керамики», Ростовский государственный строительный университет (Ростов), beauty\_girl291@mail.ru.

Поступила в редакцию 17 сентября 2014 г.

## THE STUDY OF THE PROPERTIES OF LIGHT SELF-COMPACTING CONCRETE

*L.I. Kastornykh*, Rostov State University of Civil Engineering, Rostov, Russian Federation,  
*likas9@mail.ru*.

*N.A. Sinitsina*, Rostov State University of Civil Engineering, Rostov, Russian Federation,  
*beauty\_girl291@mail.ru*

**This article presents the results of the experimental and theoretical analysis of the interaction of energy of explosive products, hole-formation and subsoil in the system of high-explosive displayed soil of holes in the basements of cast-in-place piles.**

*Keywords: energy, explosion, high-explosive shell, subsoil, high-explosive displacement, hole, basement, pile, interaction, statics, dynamics, kinematics, system.*

### References

1. Vaganov A.I. *Keramzitobeton* [The claydite-concrete]. Moscow, Gosstroyizdat, 1976, 136 p.
2. Gorin V.M., Tokareva S.A., Kabanova M.K. *Effektivnyy keramzitobeton v Rossii* [Effective claydite-concrete in Russia]. *Stroitel'nye materialy*, 2009, no. 9, pp. 54–57.
3. Bleshchik N.P., Prot'ko N.S. *Tekhnologicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoystva keramzitobetona plotnoy struktury, v tom chisle izgotovlennogo iz vysokopodvizhnykh betonnykh smesey* [Technological and physico-mechanical properties of claydite-concrete dense structure, including manufactured from mobile concrete mixes]. *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: materialy III Mezhdunar. Simpoziuma* [Problems of modern concrete and concrete: proceedings of the III international. Symposium]. Minsk, 2011. T. 2: Tekhnologiya betona, pp. 114–145.
4. Meshcherin V. *Samouplotnyayushchiysya beton: osnovy tekhnologii i sfery primeneniya* [Self-compacting concrete: fundamentals technology and applications]. ICCX Sankt-Peterburg, 2006, pp. 48–51.
5. Bolotskikh O. *Evropeyskie metody fiziko-mekhanicheskikh ispytaniy betona. Pervoe izdanie* [European methods of physical-mechanical tests of concrete. First edition]. Khar'kov, TESTING, 2010, pp. 72–80.
6. Bychkov M.V. *Sostav, struktura i svoystva legkikh konstruktsionnykh samouplotnyayushchikhsya tufobetonov* avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk [Composition, structure and properties of lightweight structural self-sealing tofaeono. Abstract of cand. dis.]. Rostov-na-Donu, 2013.
7. Nesvetaev G.V. *Betony* [Concrete]. Rostov-na-Donu, Feniks, 2011, 381 p.
8. Davidyuk A.N., Nesvetaev G.V. *Effektivnye betony dlya sovremennogo vysotnogo stroitel'stva* [Effective concrete for modern high-rise construction]. Moscow, OOO NIPKTs Voskhod-A, 2010, 148 p.

*Received 17 September 2014*