

## СОСТАВ И СВОЙСТВА САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНОВ С МИНЕРАЛЬНЫМИ НАПОЛНИТЕЛЯМИ ТИПА I И ТИПА II

**Введение.** Как показано в статистическом отчете [1], среднегодовое потребление бетона в мире составляет около  $0,5 \text{ м}^3$  на душу населения. Человечество в своей повседневной деятельности не потребляет ни одного другого материала в таких количествах, за исключением воды. Почему же бетон является столь широко применяемым материалом?!

Можно выделить несколько основных причин столь широкого применения бетона, главными из которых являются:

- бетон – универсальный строительный материал;
- существует возможность рационального объединения в одном конструктивном решении бетона и стали, взаимно дополняющих друг друга; такой композитный материал традиционно принято обозначать термином «железобетон»;
- применение бетона обеспечивает творческую свободу в создании различных архитектурных форм и размеров конструкции;
- применение бетона удобно с точки зрения ведения строительных работ при относительно невысокой их стоимости;
- бетон в отличие от дерева и большинства традиционных сталей обладает стойкостью по отношению к воздействию воды;
- не требует высокой квалификации кадров и высокотехнологичного оборудования.

**Самоуплотняющиеся бетоны (SCC)** были впервые предложены в начале девяностых годов в Японии [2], и получили развитие в рамках ряда исследовательских проектов в Европе. Сегодня самоуплотняющиеся бетоны широко применяют в мировой строительной практике. Технология самоуплотняющихся бетонов продолжает совершенствоваться до настоящего времени и основывается на применении композиций портландцементного вяжущего, традиционных заполнителей и мелкодисперсных (либо ультрадисперсных) наполнителей в рационально подобранных пропорциях, а также при необходимости агента, модифицирующего вязкость жидкой фазы, и совместимой с ним пластифицирующей добавкой I группы.

Основные требования, предъявляемые к самоуплотняющимся бетонным смесям:

- способность к самонивелированию (самовыравниванию) и уплотнению под действием собственного веса без дополнительного вибрационного воздействия;
- обеспечение полного воздухоотделения в момент укладки и растекания;
- обеспечение плотного и равномерного заполнения опалубки сложной конфигурации, насыщенной армированием;
- способность к сохранению необходимой удобоукладываемости в течение требуемого интервала времени.

Обладая большой подвижностью, самоуплотняющиеся бетоны позволяют изготавливать без использования вибрационного уплотнения конструкции, имеющие высокие показатели качества. Особенно эффективно их применение в монолитных конструкциях, насыщенных стержневой арматурой и имеющих сложную геометрическую форму.

Очевидно, что для обеспечения сформулированных требований необходимо изменить подходы к проектированию состава бетонной смеси.

Традиционно при проектировании состава самоуплотняющейся бетонной смеси используют т. н. «правило тройной пропорции», сформулированное в рекомендациях Okamura и Ozawa [2] (рис. 1):

- содержание крупного заполнителя не должно превышать 50 % объема твердой фазы;
- объемное содержание мелкого заполнителя (песка) в растворной части должно превышать 40 %;
- объемное соотношение воды и мелкодисперсной минеральной добавки-наполнителя должно составлять от 0,9 до 1,0 в зависимости от свойств наполнителя;
- содержание воды и дозировка суперпластификатора назначается из условия достижения требуемого самоуплотнения бетонной смеси.

Как следует из результатов исследований, приведенных в работе [2], рекомендованные пропорции могут подвергаться корректировке в зависимости от формы и гранулометрического состава заполнителей, вида мелкодисперсного наполнителя, требуемой прочности.

При проектировании композиций самоуплотняющихся бетонов следует учесть влияние противоположных эффектов. С одной стороны, это необходимость введения специальных добавок-модификаторов вязкости цементного теста, препятствующих сегрегации и осаждению заполнителя. С другой стороны, вводимые в смесь добавки, противодействующие сегрегации (т. н. агенты, модифицирующие вязкость жидкости) могут вызвать увеличение пористости структуры за счет вовлечения дополнительного объема воздуха. Это нарушает требование обеспечения плотной структуры и вызывает необходимость тщательного подбора названных модификаторов. Для исключения сегрегации смеси в самоуплотняющихся бетонах прибегают к применению мелко- и ультрадисперсных наполнителей с максимальной фракцией не более  $0,125 \text{ мм}$  [3].

Необходимо подчеркнуть, что ультрадисперсные минеральные добавки позволяют не только модифицировать структуру затвердевшего цементного камня, уменьшая ее пористость и улучшая характеристики транзитной зоны, но и улучшить технологические параметры, в частности, повысить удобоукладываемость. Вместе с тем, роль, которую играют мелко- и ультрадисперсные минеральные добавки в цементном бетоне достаточно сложна и неоднозначна, а

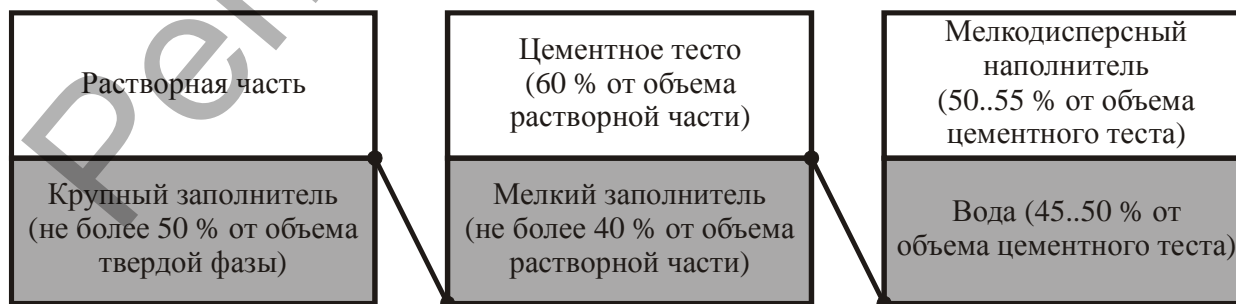


Рисунок 1 – Пропорции составляющих самоуплотняющейся бетонной смеси согласно рекомендациям Okamura и Ozawa [1]

механизм их действия требует дальнейшего изучения.

Введенный в действие СТБ EN 206 [4] подразделяет ультрадисперсные наполнители в зависимости от механизма их действия на две категории:

- 1) ультрадисперсные минеральные наполнители, заполняющие межзерновое пространство цементного камня, уменьшающие пористость структуры, но показывающие незначительный пуццолановый эффект – *наполнители I типа*;
- 2) ультрадисперсные минеральные добавки наполнители, обладающие пуццолановым эффектом – *наполнители II типа*.

Следует также отметить влияние вида суперпластификатора при использовании различных категорий ультрадисперсных наполнителей. Влияние пластификаторов различного типа на свойства цементных систем, в том числе расширяющихся и самоуплотняющихся, а также выбор того либо иного пластификатора подробно рассмотрены и обоснованы в работах [5, 6]. Основным выводом, подтвержденным экспериментальными исследованиями, является необходимость использования пластифицирующих добавок I группы на основе поликарбоксилатов, получивших название в обиходе «гиперпластификаторы». При этом механизм и принцип действия, а также достигаемые эффекты, практически не зависят от фирм-производителей.

**Экспериментальные исследования.** В Испытательном центре УО «БрГТУ» были запроектированы и апробированы составы самоуплотняющихся бетонных смесей в соответствии с требованиями проекта [7] и СТБ EN 206 [4].

Исходные сырьевые материалы:

- ✓ Сульфатостойкий цемент СЕМ III/A-III 42,5Н СС ГОСТ 22266, с содержанием СзА не более 5%;
- ✓ Щебень гранитный ГОСТ 8267–93 фракции 5..10 мм,
- ✓ Песок ГОСТ 8736–93, модуль крупности  $M_k=2,1$ , карьер «Боровое».
- ✓ Водная суспензия микрокремнезема ТУ ВУ 190679156.005-2015 (40% микрокремнезема), содержание  $SiO_2$ , % от массы сухого вещества –  $\geq 90$ ;
- ✓ Доломит тонкодисперсный ДТ-1, удельная поверхность  $S_{уд}=2750\pm 50\text{ м}^2/\text{кг}$ , нормальная густота  $21\pm 1$ , %, СТБ 2060-2010;
- ✓ Добавка пластифицирующая I группы «Реламикс ПК» (на основе поликарбоксилатов) ТУ ВУ 190679156.002-2013;
- ✓ Вода СТБ 1114, содержание сульфат-ионов ( $SO_4^{2-}$ ) –  $24,8\text{ мг}/\text{дм}^3$ ; содержание хлорид-ионов ( $Cl^-$ ) –  $30\text{ мг}/\text{дм}^3$ ; содержание взвешенных веществ (замутняющих примесей) –  $6,6\text{ мг}/\text{дм}^3$ ; следов нефтепродуктов, масел и жиров на поверхности воды не обнаружено.

Приступая к подбору состава самоуплотняющегося бетона, были проанализированы как базовые подходы правила «тройной пропорции», так и подходы, прописанные в действующем ТКП [8]. В связи с излишней перегруженностью расчета, базирующегося на ранее изложенных подходах Ахвердова И.Н., Блещика Н.П., избыточного эмпирическими формулами и коэффициентами [8], выбор пал на проектирование с учетом правил «тройной пропорции» [2].

Проектирование выполняли при следующих граничных условиях:

- количество вяжущей части (цемент или цемент+наполнитель типа II) не должно превышать  $500\text{ кг}/\text{м}^3$  бетонной смеси для минимизации риска трещинообразования из-за высокой экзотермии массивной плиты и воздушной усадки, обусловленной высоким содержанием вяжущего, возрастанием водопотребности, особенно при введении ультрадисперсных наполнителей II типа;
- ограничение максимального размера зерна крупного заполнителя размером фракции 10 мм, что было установлено требованиями к минимальному расстоянию между арматурными стержнями в конструкции и технологией укладки самоуплотняющегося бетона в соответствии с положениями СТБ 1544. Кроме того, в соответствии с п. 6.2.5.2 [8] наибольший размер зерен крупного заполнителя не должен превышать 1/3 расстояния между арматурными стержнями;

- применение сульфатостойкого цемента с содержанием алюминатов до 5%, что определено условиями эксплуатации и требованиями документа [7];
- количество наполнителя типа II в составе бетонной смеси от 10 до 15% исходя из возможностей достижения максимального пуццоланового эффекта. При меньших дозировках не весь портландит связывается в гидросиликаты, при больших – происходит «разжижение» системы за счет перенаполнения наполнителем с весьма высокой удельной поверхностью ( $\sim 20000\text{ м}^2/\text{кг}$ ), приводящее к увеличению пористости и проницаемости. При этом, в соответствии с требованиями [4], при расчете водоцементного отношения учитываемое максимальное количество наполнителя типа II – 11%. Оптимальное соотношение между крупным и мелким заполнителем рассчитывалось по методике, детально изложенной в работе [9]. Графическая интерпретация подобранной смеси заполнителя с учетом граничных значений оптимального рассева представлена на рис. 2.

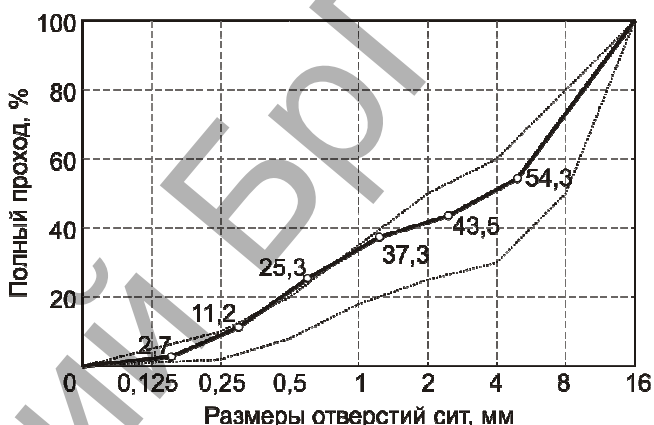


Рисунок 2 – Гранулометрический состав смеси заполнителя в соответствии с [9, 10, 11]

В смесях с применением микрокремнезема (наполнителя типа II по классификации [4]), его учитывали при определении содержания цемента и водоцементного отношения в соответствии с требованиями СТБ EN 206. При расчете состава бетона учитывали микрокремнезем посредством замены водоцементного отношения соотношением «вода/(цемент +  $k \times$  наполнитель)».

Для бетона на цементе СЕМ I и СЕМ III/A (кроме цементов, содержащих микрокремнезем) по EN 197-1 в соответствии с [4] допустимы следующие значения коэффициента  $k$  при:

- установленном водоцементном отношении  $\leq 0,45$   $k = 2,0$ ;
- установленном водоцементное отношение  $> 0,45$   $k = 2,0$ , за исключением классов экспозиции XC и XF, для которых  $k = 1,0$ .

Таким образом, водоцементное отношение будет равно:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{B}{Ц + k \cdot H} = \frac{125 + 67,5}{430 + 2 \cdot 45} = 0,37.$$

Номинальный состав бетона с учетом применения наполнителей различных типов представлен в табл. 1.

В соответствии с требованиями СТБ EN 206 были определены основные контролируемые показатели качества самоуплотняющихся бетонных смесей (см. табл. 2).

Величины сохраняемости удобоукладываемости во времени представлены в табл. 3.

В связи с прогнозируемым использованием бетонных смесей в массивной фундаментной плите толщиной 2,5 м одним из основных требований являлось снижение теплоты, выделяемой при экзотермии вяжущего. В лаборатории испытательного центра БрГТУ инженером Пикулой А.И. были выполнены экспериментальные исследования выделения теплоты при гидратации.

В соответствии с данными, полученными в ходе проверки экзотермии запроектированного бетона (рис. 3), максимальная температура бетонной смеси достигает  $37^\circ\text{C}$ . Пик температур наступает через 25 часов после затворения бетонной смеси водой.

Таблица 1 – Номинальный состав самоуплотняющегося бетона

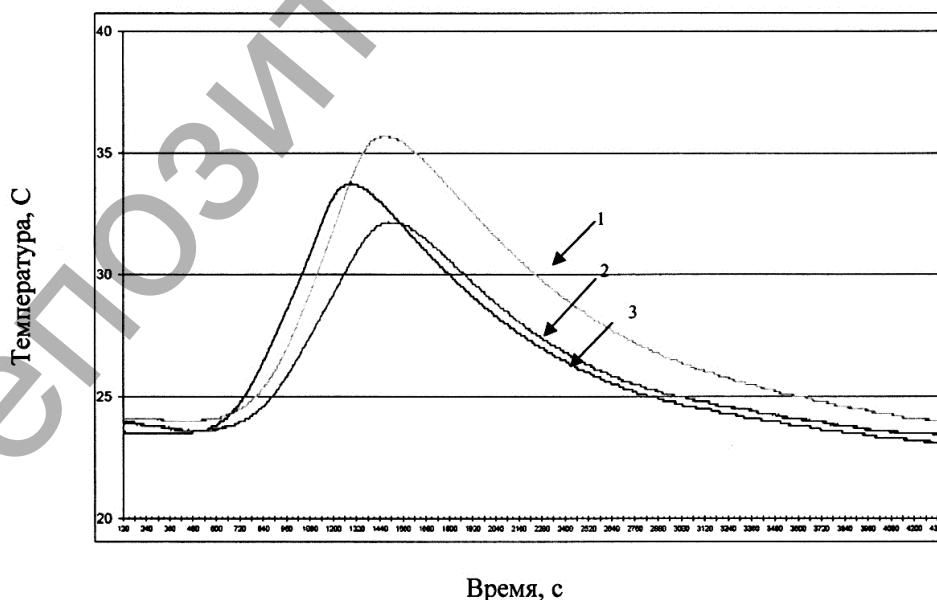
		Расход материалов на 1 м <sup>3</sup> бетонной смеси						В/Ц
		Цемент, кг	Суспензия МК <sup>2</sup> , кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л	Реламикс ПК, л	
			ДТ-1 <sup>3</sup> , кг					
<b>БСГТ РК5 С<sup>30/37</sup> St-3</b>	Состав I	430	112,5 (в т.ч. 45 кг сухого МК)	860	885	125	7,92	0,37
	Состав II	470	80	780	890	228	5,1	0,48

Таблица 2 – Характеристики самоуплотняющихся бетонных смесей

Характеристики СУБ	Требования СТБ EN 206	Номинальный состав СУБ		ТНПА на методы испытаний
		Состав I	Состав II	
Класс консистенции по расплыву конуса	SF1 (PK=550..650 мм) SF2 (PK=660..750 мм)	SF2 (PK=660 мм)	SF1 (PK=600 мм)	СТБ EN 12350-8
Класс по вязкости t <sub>500</sub>	VS2 (t <sub>500</sub> ≥2,0 с)	VS2 (t <sub>500</sub> =2,1 с)	VS2 (t <sub>500</sub> =2,4 с)	СТБ EN 12350-8
Класс по вязкости t <sub>v</sub>	VF1 (t <sub>v</sub> <9,0 с)	VF1 (t <sub>v</sub> =3,3 с)	VF1 (t <sub>v</sub> =3,3 с)	СТБ EN 12350-9
После 5-минутного выдерживания		7,8 с	3,3 с	
Класс по растекаемости в стесненных условиях (с применением блокировочного кольца)	PJ2 ≥10 с 16 арматурными стержнями	PJ2 PJ=8 мм, расплыв конуса SF <sub>J</sub> =67 см, интервал времени растекания t <sub>500J</sub> =4,1	PJ2 PJ=8 мм, расплыв конуса SF <sub>J</sub> =60 см, интервал времени растекания t <sub>500J</sub> =1,9 с	СТБ EN 12350-12
Класс по сопротивлению расслаиванию при просеивании	SR2 (≤15)	SR=1,52%, водоотделения на поверхности бетонной смеси не зафиксировано	SR=8,4%, водоотделения на поверхности бетонной смеси не зафиксировано	СТБ EN 12350-11
Средняя плотность		ρ=2435кг/м <sup>3</sup>	ρ=2410,7 кг/м <sup>3</sup>	СТБ EN 12350-6

Таблица 3 – Величина сохраняемости, удобоукладываемости

		Время τ, мин				
		0	30	60	90	120
Состав I	Расплыв конуса, мм	670	620	540	520	460
	Классы по растекаемости [4]	<b>F6</b>	<b>F5</b>	<b>F4</b>	<b>F4</b>	<b>F3</b>
Состав II	Расплыв конуса, мм	600	600	570	520	420
	Классы по растекаемости [4]	<b>F5</b>	<b>F5</b>	<b>F5</b>	<b>F4</b>	<b>F3</b>



1 – состав с наполнителем типа II, 2 – состав с наполнителем типа I, 3 – эталонный состав без наполнителей

Рисунок 3 – Результаты исследования бетонной смеси на экзотермию

<sup>2</sup> – ДТ-1 классифицирован как наполнитель типа I в соответствии с требованиями [4]

<sup>3</sup> – МК классифицирован как наполнитель типа II в соответствии с требованиями [4]

Максимальную температуру при гидратации показали бетонные смеси с добавкой микрокремнезема, что объясняется высокой пуццолановой активностью последнего. Состав без наполнителя занимает «промежуточное положение», а состав, в котором часть активного цемента заменяется инертным доломитом соответственно показывает более низкие температуры при гидратации. Введение в такие смеси пластификаторов поликарбоксилатного типа несколько сдвигает пик экзотермии во времени на более поздние сроки, что можно связать с определенным блокирующим эффектом пластификаторов.

В соответствии с запроектированными составами бетонной смеси были заформованы контрольные образцы и проведены испытания бетона на сжатие. Средняя прочность бетона варьируемых составов составила (см. рис. 4).

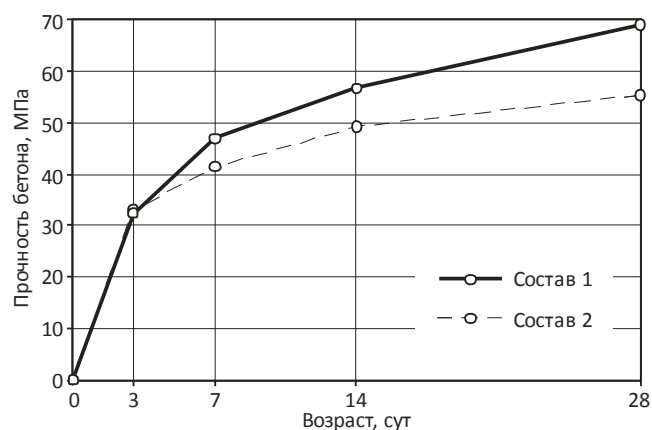


Рисунок 4 – Изменение прочности на сжатие во времени для проектируемых бетонов

Прочность бетона с применением микрокремнезема начиная с 7-сут твердения показывает более высокую кинетику набора. В стандартном возрасте прочность бетона с микрокремнеземом составила 69,15 МПа, в то время как для бетона на доломитовом утяжелителе 55,34 МПа. Прирост прочности на сжатие бетона состава 1 около 25% обусловлен связыванием портландита в гидратирующей системе в отвечающие за прочность комплексы CSH благодаря пуццолановому эффекту микрокремнезема. При этом, следует все же отметить определенные сложности с вводом микрокремнезема, обладающего высокой удельной поверхностью (~20000 м<sup>2</sup>/кг). Ввод в сухом виде не актуален из-за флокулирующей способности, ввод в виде суспензии порой затруднен из-за некорректного выбора агента вязкости, что приводит к расслоению и оседанию микрокремнезема.

**Заключение.** Как видно из представленных выше данных, разработанные составы полностью удовлетворяют требованиям проекта [7] и СТБ EN 206. Отличия наблюдаются только в прочностных показателях, что обусловлено применением наполнителей типа I и II

в соответствии с классификацией [4]. Применение инертного наполнителя приводит к эффекту наполнения, применение же наполнителя типа II позволяет реализовать пуццолановый эффект за счет связывания крупнодисперсного портландита в мелкокристаллический гель CSH, что и приводит к росту прочности бетона. Однако, замена части цемента наполнителем типа I позволяет снизить теплоту гидратации, что является одним из основных требований при возведении массивных конструкций, подверженных риску трещинообразования. Кроме того, введение наполнителя типа II требует специальной технологии из-за высокой удельной поверхности и риска флокулирования в более крупные агрегаты.

Выбор того либо иного состава в итоге должен быть обусловлен требованиями спецификации на данный бетон.

#### СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. European Ready Mixed Concrete Industry Statistics based on the Y2013 production data. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ermco.eu/publications/statistics/>
2. Okamura H., Ozawa K.: Mix Design for Self-Compacting Concrete. "Concrete Library of JSCE", N 25, June, 1995.
3. Greszczyk, S. Beton samozagęszczalny – projektowanie, właściwości, kierunki rozwoju. – Inz. I bud., N 9/2002.
4. Бетон. Требования, показатели, изготовление и соответствие. Проект: СТБ EN 206.
5. Павлова, И.П. Влияние пластифицирующих добавок на свойства расширяющихся цементных систем // Вестник ПГУ, Полоцк, 2017 – С. 125–131.
6. Отчет по ХД 16/82 «Подбор составов бетона с применением добавок ООО «ПолипластХИМ». Этап №2: ««Определение эффективности пластифицирующих добавок в сульфаталюминатных расширяющихся цементных системах». – Брест: БрГТУ, 2016 – 53 с.
7. Документ DD5537A-43A3 Требования к сырьевым материалам, показателям качества для бетонирования монолитной плиты на отметке +129,310 по объекту «ОАО «Нафтан». Строительство установки замедленного коксования нефтяных остатков», позиция «Коксовые барабаны».
8. Бетонные и железобетонные изделия и конструкции из самоуплотняющегося бетона. Правила изготовления: ТКП 5 45-03-266-2012. – Минск: Стройтехнорм, 2013 – 32 с.
9. Tur W., Fic S. Materiały budowlane I technologia betonow. Podrecznik do swiczen laboratoryjnych // Biala Podlaska, 2012 – 115 p.
10. Методы определения геометрических показателей заполнителей. Часть 1. Определение гранулометрического состава. Метод просеивания: СТБ EN 933-1-2015 – Минск: Стройтехнорм, 2016 – 18 с.
11. Методы определения геометрических свойств гранулометрических фракций горных пород. Часть 2. Определение гранулометрического состава. Контрольные сита. Номинальные размеры сит: СТБ EN 933-2-2002 – Минск: Стройтехнорм, 2005 – 5 с.

Материал поступил в редакцию 04.03.2017

#### PAVLOVA I.P. Mix Design and Properties of Self-Compacting Concrete with additions of Type I and Type II

In article results of concrete mix designing, based on rules of «triple proportion» with accounting of aggregate continuous grading, and experimental researches of properties of self-compacted concrete (SCC) according to requirements STB EN 206 are presented. Influence of type and amount of additions on fresh concrete mix workability and concrete strength parameters are revealed.

УДК 691.32 (043.3)

Павлова И.П., Беломесова К.Ю.

## ВЛИЯНИЕ РАСШИРЯЮЩИХСЯ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ МЕТАКАОЛИНА НА СРОКИ СХВАТЫВАНИЯ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Введение.** Приоритетным направлением в строительной отрасли является производство эффективных материалов с высокими характеристиками. Бетон как универсальный строительный материал, обладающий рядом высоких фи-

зических характеристик. Бетон как универсальный строительный материал, обладающий рядом высоких фи-

Беломесова Кристина Юрьевна, магистрант кафедры технологии бетона и строительных материалов Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БрГТУ, 224017, г. Брест, ул. Московская, 267.