

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16

Наруть В.В., *Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И.
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
*E-mail: larsen.osana@mail.ru

РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА НА ОСНОВЕ БЕТОННОГО ЛОМА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СТРУКТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Аннотация. Развитие математических методов моделирования вызывает необходимость одно-временного совершенствования критериев оценки материалов бетона как многокомпонентных, так и с отходами промышленности, которые позволили бы получить более точные количественные зависимости «состав – структура – технология – свойства». Это возможно только при формализации структуры бетона и установлении с помощью экспериментальных исследований количественных соотношений между характеристиками структуры бетонов и их свойствам. В статье приводится методика подбора состава самоуплотняющегося бетона на основе продуктов дробления бетонного лома с использованием математических методов моделирования путем решения системы полученных уравнений соответствующих математических моделей. Аргументными характеристиками полученных математических моделей являются структурные характеристики бетона, определяемые к концу периода формирования структуры. Демонтаж ветхих зданий способствует образованию значительного количества бетонного и железобетонного лома. В исследовании проведен анализ продуктов дробления бетонного лома и установлена возможность его эффективного применения. В качестве исходных материалов для самоуплотняющегося бетона может служить щебень из дроблёного бетона и отсева его дробления. Определено оптимальное содержание микрозаполнителя в составе самоуплотняющегося бетона. Установлен оптимальный режим помола отсева дробления, обусловленный условиями работы помольного оборудования для получения микрозаполнителя заданной удельной поверхности. Запроектирован зерновой состав смеси кварцевого песка и щебня из дроблёного бетона фракции 5–10 мм исходя из условия максимального приближения к эталонной кривой Фуллера.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, бетонный лом, щебень из дроблёного бетона, отсев дробления, активация, гранулометрия, структурные характеристики

Введение. В настоящее время бетон является наиболее широко используемым строительным материалом в России. По данным [1] в 2018 году было произведено 33 955,5 тыс. м³ товарного бетона. Количество углекислого газа, выделяемого при производстве портландцемента, составляет около 10 % общего количества, выделяемого в окружающую среду CO₂. За последние десять лет в России резко возросло количество отходов строительства и сноса зданий, что связано с принятой в 2017 году программой реновации. Так, по данным [2], после разбора пятиэтажек образуется порядка 5 млн. тонн различных материалов.

Проблема утилизации и повторного использования строительных отходов актуальна не только для России, но и для зарубежных стран. Это в первую очередь связано с улучшением экологической ситуации, получением дешевых материалов для нового строительства, сокращением транспортных потоков, связанных с поставками заполнителей для бетона, сохранением природных ресурсов. Переработка отходов строитель-

ной индустрии и использование в качестве заполнителей дробленого бетона позволит ограничить потребление невозобновляемых природных ресурсов и свести к минимуму отходы и связанные с ними выбросы, что будет способствовать как сохранению окружающей среды, так и сохранению природных ресурсов [3].

В течение последних лет широкое применение получили исследования свойств бетонов с применением вторичных заполнителей из бетонного лома не только в России, но и во всем мире [4, 5, 6]. Введение вторичных заполнителей оказывает влияние на прочностные свойства бетонов и технологические свойства бетонных смесей [7]. Свойства вторичных заполнителей значительно отличаются от свойств заполнителей, изготовленных из прочных горных пород. Вследствие этого их применение ограничено в бетонах несущих конструкций. Такие заполнители могут эффективно использоваться в качестве исходного материала для изготовления неконструкционных бетонов [8] или для других целей. Отмечается применение вторичных заполнителей в кон-

струкционных бетонных элементах при содержании растворной составляющей в заполнителе до 44 % [9–13]. Имеется опыт применения крупного заполнителя на основе дробленого бетона не только в обычных вибрированных бетонах [14, 15], но и в самоуплотняющихся, получивших широкое распространение в последние десятилетия [16]. Данные смеси способны самостоятельно, без внешнего побуждения, уплотняться и вытеснять из своего объёма вовлеченный воздух за счёт высокой подвижности. Применение самоуплотняющихся бетонов значительно сокращает трудоёмкость работ, повышается качество изделий и конструкций. Накопленный за последнее время опыт позволяет изготавливать самоуплотняющиеся бетонные смеси на различных материалах и с различными характеристиками. Однако для получения эффекта самоуплотнения необходимо соблюдать определенные условия:

- применение большого количества вяжущего теста, включающего цемент и микрозаполнитель;
- применение мелких фракций заполнителя и ограниченное количество крупного заполнителя;
- повышенная доля песка (r) в смеси заполнителей;
- необходим подбор оптимальной granulометрии смеси заполнителей;

– применение высокоэффективных суперпластификаторов;

– рациональный подбор воды затворения.

Основываясь на данных условиях, а также используя структурные характеристики бетона, авторами статьи была разработана методика определения состава самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома. Развитие математических методов моделирования вызывает необходимость одновременного совершенствования критериев оценки материалов бетона как многокомпонентных, так и с отходами промышленности, которые позволили бы получить более точные количественные зависимости «состав – структура – технология – свойства». Это возможно только при формализации структуры бетона и установлении с помощью экспериментальных исследований количественных соотношений между характеристиками структуры бетонов и их свойствам.

Методология. В работе применялись следующие виды материалов:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Б, ПАО «Мордовцемент»;
- кварцевый карьерный песок с модулем крупности $M_k=1,8$ ЗАО «Мансуровское карьероуправление» с granulометрическим составом, представленным в табл. 1.

Таблица 1

Зерновой состав кварцевого песка

Размер ячейки сита, мм	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0
Частные остатки, %			2,9	5,0	13,6	36,4	36,3	5,6
Полные остатки, %	0	0,2	2,9	7,9	21,5	57,9	94,2	100
Модуль крупности песка: 1,8 («мелкий»)								

- суперпластификатор: Sika ViscoCrete E55, ООО «Зика»;
- сухой суперпластификатор: Melflux 5581F, BASF (Германия);
- вода водопроводная;
- бетонный лом, полученный из внутренней стеновой панели 9BC1 жилого дома 1605/АМ-5, демонтированного в микрорайоне Кунцево по программе реновации г. Москвы.

Бетонный лом подвергался лабораторной переработке путем дробления крупных кусков стеновой панели 9BC1 на лабораторном прессе в цилиндре $\varnothing 150$ мм для испытания щебня на дробимость по ГОСТ 8269.0-97 и рассеивания полученного материала на наборе сит: 12,5; 10; 7,5; 5; 2,5 мм. Путем компоновки частных остатков на ситах дробленого щебня была получена фр.5-10 мм, отвечающая по зерновому составу

ГОСТ 32495-2013. В табл. 2 представлены результаты granulометрического состава полученного щебня из бетонного лома фр. 5–10 мм.

Таблица 2

Зерновой состав полученного щебня из бетонного лома фр. 5–10 мм

Наименование остатков	Остатки на ситах, % по массе				
	12,5	10	7,5	5	2,5
Частные	0,4	4,7	41,6	47	4,9
Полные	0,4	5,1	46,7	93,7	98,6

Физико-механические характеристики полученного щебня из дробленого бетона фр. 5–10 мм представлены в табл. 3.

Таблица 3
Физико-механические характеристики щебня
из дробленого бетона фр. 5–10 мм

Характеристики	Размерность	Фактические значения
Прочность	марка	400
Содержание пылевидных частиц	%	0,8
Содержание зёрен прочностью менее 20 МПа	%	9,6
Содержание зёрен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы	%	22,3
Водопоглощение (по массе)	%	3,8
Засоряющие примеси неорганического происхождения	группа	I

Основная часть. В результате лабораторной переработки крупных кусков, помимо полученного щебня, образуется отсев дробления с фракцией 0–2,5 мм. Полученный отсев подвергался механохимической активации в вибромельнице совместно с сухим суперпластификатором поликарбоксилатного типа Melflux 5581F. Активация отсева дробления щебня из дроблёного бетона фр. 5–10 мм осуществлялась в лабораторной вибромельнице. Варьировалась величина времени активации и дозировка Melflux 5581F; количество и масса шаров, степень заполнения рабочей зоны камеры мельницы, скорость поступления и удаления материала оставались постоянными.

Диапазон бесперебойного времени измельчения выбран исходя из оптимальной производительности помольного оборудования без его перегрева и экстремальных условий работы.

Использование методов математического планирования эксперимента позволило установить оптимальную продолжительность активации в вибромельнице отсева дробления и оптимальную дозировку суперпластификатором Melflux 5581F. Установлено, что при продолжительности активации, равной 150 мин, совместно с суперпластификатором в количестве 0,5 % от массы микрозаполнителя величина удельной поверхности полученного микрозаполнителя составляет $4575 \text{ см}^2/\text{г}$, при таком воздействии и введении в цементное тесто обеспечивается максимальный эффект водоредуцирования и увеличения прочности. При этом оптимальное содержание микрозаполнителя в составе композиционного вяжущего соответствует 22 % [17].

Проектирование оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей, включающего кварцевый песок и щебень из дробленого бетона фр. 5–10 мм, осуществлялось из условий максимального приближения кривых просеивания заполнителей к эталонной кривой распределения частиц Фуллера в интервале соотношений $r = 0,45–0,55$. При этом обеспечивается минимальная пустотность смеси и наиболее благоприятные условия для создания текучести самоуплотняющейся бетонной смеси. В результате математической обработки полученных данных установлено наименьшее расхождение с эталонной кривой Фуллера, что составляет 14,12 % и достигается при $r = 0,458$ (рис. 1).

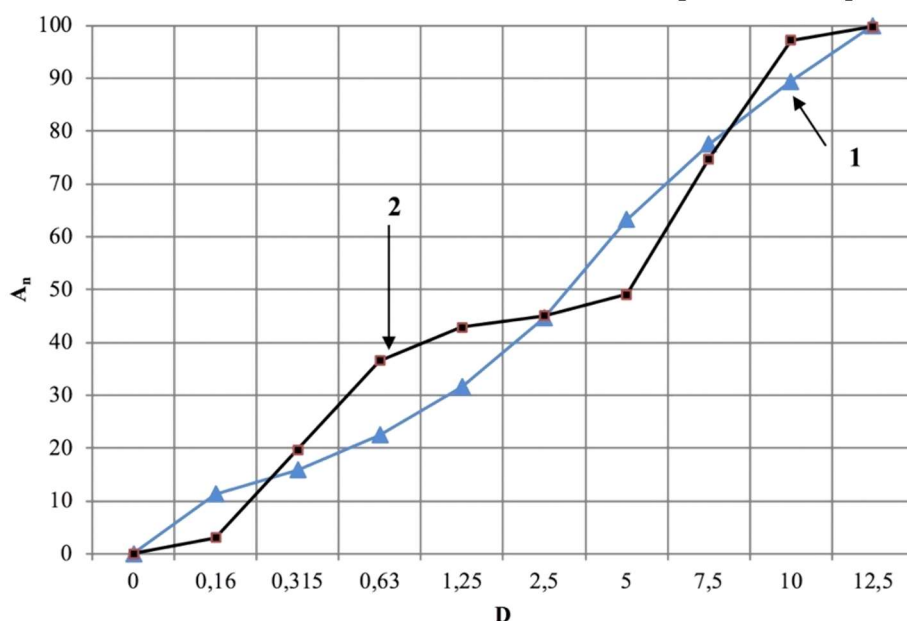


Рис. 1. Проектирование зернового состава заполнителей СУБ:

D – диаметр отверстия сита (мм); A_n – полный проход через сито (%);

1 – эталонная кривая по Фуллеру; 2 – оптимальный состав с долей песка в смеси заполнителей (r)

Состав самоуплотняющегося бетона определялся с использованием математико-статистического метода. Зависимость «состав – структура – свойства» представлена в виде многофакторных математических моделей. В качестве характеристик согласования между математическими моделями применялись единые структурные характеристики бетона, сформулированные Горчаковым Г.И. и развитые в работах Баженова Ю.М., Алимова Л.А., Воронина В.В.

Согласно структурной теории процесс формирования структуры цементных систем связан с распределением воды на ранней стадии твердения. Заполнитель, введенный в цементное (вяжущее) тесто, существенно влияет на свойства бетонной смеси, причём тем в большей степени, чем выше его содержание. Заполнитель иммобилизует воду затворения, при этом структура формируется при пониженном В/Ц (В/В), получившем название истинного (В/Ц_{ист} или W). Вода, как бы отвлекаемая заполнителем, участвует как в перераспределении пор в сложившемся при W каркасе цементного камня, так и в создании пор контактной зоны между цементным камнем и заполнителем [18].

Количественным показателем содержания вяжущего является объёмная концентрация вяжущего в бетонной смеси (C), определяемая по формуле:

$$C = \frac{\text{Ц}}{1000} \left(\frac{1}{\rho} + W \right) \quad (1),$$

где Ц – расход цемента или вяжущего, кг; ρ – плотность вяжущего, т/м³; W – истинное водоцементное (или водовязущее) отношение.

В работе определялись единые структурные характеристики бетона, определяемые к концу периода формирования структуры:

– объёмная концентрация вяжущего C, представляющая собой сумму цемента и микрозаполнителя, которая определяет макроструктуру, т.е. формирование бетона как конгломерата, выражается в долях от объёма бетона;

– истинное водовязущее отношение W, которое оказывает решающее влияние на макро- и микроструктуру, в частности, на объём и характер пор в цементном камне, а так же качество контактной зоны между цементным камнем и заполнителем;

– степень гидратации вяжущего α , показывает изменение прочности цементного камня в процессе твердения. Количество новообразований в цементном камне прямо пропорционально α , численно равной отношению прореагировавшей с водой части вяжущего к общей массе вяжущего.

Согласно структурной теории, все основные свойства бетонов являются функцией C, W и α . Величина C выражает соотношение между вяжущим и заполнителем, данная характеристика может быть принята в качестве показателя макроструктуры. Величины W и α совместно определяют объём пор в бетоне данного возраста, т.е. характеризуют микроструктуру бетона [19].

В исследовании предполагалось, что степень гидратации вяжущего α у всех составов проектируемого самоуплотняющегося бетона одинакова, поэтому третьим фактором варьирования принимался фактор количества суперпластификатора Sika ViscoCrete E55. Для получения статистико-математических зависимостей свойств самоуплотняющегося бетона от его состава и структуры были проведены эксперименты с применением трёхфакторного плана на кубе типа В-D13. Факторы и уровни их варьирования представлены в табл. 4.

Составы и технологические свойства самоуплотняющихся бетонных смесей представлены в табл. 5 согласно расчёту и плану эксперимента.

В результате обработки данных с использованием специализированного программного обеспечения получены адекватные полиномиальные математические модели, описывающие свойства самоуплотняющегося бетона. Данные модели, после исключения незначимых коэффициентов, представлены в табл. 7.

Таблица 4

Значение факторов и уровни их варьирования

Фактор			Уровни варьирования			Интервал варьирования
Наименование	Обозначение		-1	0	+1	
	Натуральные единицы	Кодированные единицы				
C	доли	X ₁	0,33	0,355	0,38	0,025
W	соотношение	X ₂	0,25	0,26	0,27	0,01
Дозировка SVC E55 по массе вяжущего	%	X ₃	0,2	0,275	0,35	0,075

Таблица 5

Составы и свойства самоуплотняющихся бетонных смесей

№ опыта/состава	Расход материалов кг на 1 м ³						Технологические параметры бетонной смеси		
	ЦЕМ I 42,5Б	МН	Песок	Щебень из дробленого бетона фр. 5–10 мм	Sika ViscoCrete E55	Вода	Распływ конуса ¹ , мм	Вязкость t ₅₀₀ ² , сек	Плотность, кг/м ³
1	445	125	717	611	1,14	219	551	19	2118
2	512	145	664	565	1,31	235	607	12	2120
3	430	121	717	611	1,1	226	563	16	2105
4	445	126	717	611	2	219	616	20	2120
5	436	123	717	611	1,62	223	574	15	2110
6	485	137	685	584	1,8	229	619	14	2120
7	475	134	685	584	1,22	233	598	14	2112
8	453	128	698	595	2,03	231	640	11	2106
9	506	143	664	565	2,27	238	652	9	2118
10	495	140	664	565	1,61	242	633	10	2108

Примечание: водоотделение всех составов бетонных смесей не превышало 0,8 % в соответствии с ГОСТ 10181-2014

1. Испытание проводилось по ГОСТ Р 58002-2017/EN 12350-8:2010 (часть 8);

2. Испытания проводилось по EN 12350-8.

Таблица 6

Свойства самоуплотняющихся бетонов

№ состава	Прочности при сжатии, МПа, сутки			Прочность на растяжение при изгибе, МПа (28 суток)	F (циклы)	W (МПа)
	3	7	28			
1	16,0	26,2	33,6	3,52	100	0,4
2	21,8	34,3	42,9	4,17	150	0,8
3	14,5	24,6	31,6	3,37	75	0,4
4	17,0	29,0	36,4	3,77	75	0,6
5	16,5	27,6	35,8	3,79	75	0,6
6	19,7	33,2	40,8	3,99	150	0,6
7	18,1	32,2	38,9	3,88	150	0,8
8	17,5	30,3	37,7	3,83	100	0,6
9	21,9	37,0	45,0	4,33	200	0,8
10	20,7	33,6	41,5	4,18	150	0,8

Примечания:

– F – морозостойкость. Первый базовый метод ГОСТ 10060-2012

– W – водонепроницаемость. Метод «мокрого пятна» ГОСТ 12730.5-84

Таблица 7

Математические модели свойств самоуплотняющегося бетона

№ п/п	Выходной параметр, (Y)	Уравнение регрессии	
1	Распływ обратного конуса, мм	$Y = 604,856 + 25,66 \cdot X_1 + 3,66 \cdot X_2 + 23,535 \cdot X_3 - 11,236 \cdot X_1^2 + 7,489 \cdot X_2^2 + 8,755 \cdot X_3^2 - 4,464 \cdot X_1 \cdot X_3 - 4,519 \cdot X_2 \cdot X_3$ (13)	
2	Вязкость t ₅₀₀ , сек	$Y = 12,666 - 3,317 \cdot X_1 - 1,653 \cdot X_2 - 0,978 \cdot X_3 - 0,129 \cdot X_1^2 + 0,775 \cdot X_2^2 + 0,602 \cdot X_3^2 + 0,753 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0,569 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1,065 \cdot X_2 \cdot X_3$ (14)	
3	Прочности при сжатии, МПа	3 сутки	$Y = 18,641 + 2,607 \cdot X_1 - 0,694 \cdot X_2 + 0,49 \cdot X_3$ (15)
		7 сутки	$Y = 32,445 + 3,983 \cdot X_1 - 0,92 \cdot X_2 + 1,039 \cdot X_3 - 0,865 \cdot X_1^2 - 1,175 \cdot X_2^2$ (16)
		28 суток	$Y = 39,876 + 4,15 \cdot X_1 - 1,085 \cdot X_2 + 1,179 \cdot X_3 - 1,226 \cdot X_2^2$ (17)
4	Прочность на растяжение при изгибе, МПа (28 суток)	$Y = 3,994 + 0,279 \cdot X_1 + 0,049 \cdot X_2 + 0,09 \cdot X_3 - 0,117 \cdot X_2^2 - 0,054 \cdot X_1 \cdot X_3$ (18)	
5	F, циклы	$Y = 134,96 + 46,425 \cdot X_1 - 9,442 \cdot X_2 - 20,067 \cdot X_2^2 + 15,083 \cdot X_1 \cdot X_3$ (19)	
6	W, МПа	$Y = 0,571 + 0,11 \cdot X_1 - 0,046 \cdot X_3 + 0,134 \cdot X_1^2 - 0,068 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,124 \cdot X_2 \cdot X_3$ (20)	

Использование моделей, представленных в табл. 7, позволяет проектировать составы самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома прочностью на сжатие 35–45 МПа, F₁₅₀–F₂₀₀, водонепроницаемостью W4–W8.

Выводы. Принцип подбора состава основан на совместном рассмотрении (решении) полученных математических моделей. При этом выбираются соответствующие модели необходимых свойств самоуплотняющейся бетонной смеси и/или бетона. Структурные характеристики, а также количество суперпластификатора Sika ViscoCrete E55, находятся путём совместного решения соответствующих уравнений. Полученные значения должны одновременно удовлетворять предъявляемым требованиям. Перевод полученных значений уравнений в натуральный вид осуществляется по формулам:

$$x_1 = \frac{(C-0,355)}{0,025} \quad (1)$$

$$x_2 = \frac{(W-0,26)}{0,01} \quad (2)$$

$$x_3 = \frac{(SVC E55-0,275)}{0,075} \quad (3)$$

На основании проведённых исследований можно сделать следующие выводы:

1. При демонтаже ветхих жилых зданий образуется большое количество бетонного и железобетонного лома. Данный лом целесообразно подвергать переработки для последующего использования в технологии бетона, в том числе для получения высокоэффективных самоуплотняющихся бетонов;

2. При лабораторном дроблении из внутренней однослойной стеновой панели 9BC1 получен щебень фр. 5–10 мм;

3. Побочным продуктом дробления является отсев 0–2,5 мм. Данный отсев подвергался механохимической активации в вибромельнице совместно с сухим суперпластификатором Melflux 5581F. Оптимальное время активации – 150 мин., дозировка Melflux 5581F вводимая при активации – 0,5 % от массы отсева. Итогом активации является получение микронаполнителя (активной минеральной добавки). При содержании микронаполнителя в цементной системе в количестве 22 % наблюдается эффект водоредуцирования и увеличения прочности композита;

4. Проектирование зернового состава смеси заполнителей (песок, щебень из дробленого бетона фр. 5–10 мм) для самоуплотняющегося бетона осуществлялось из условия наибольшего приближения к эталонной кривой распределения частиц Фуллера в интервале соотношений r (доли песка в смеси заполнителей) = 0,45–0,55, что достигается при $r = 0,458$;

5. Проектирование состава самоуплотняющегося бетона целесообразно осуществлять математико-статистическим методом с применением структурных характеристик C , W и α ;

6. Методом математического планирования эксперимента получены математические модели (уравнения) свойств самоуплотняющегося бетона, зависящие от структурных характеристик;

7. При решении соответствующих уравнений определяются структурные характеристики самоуплотняющегося бетона, зная которые можно получить бетон заданных свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Россия в цифрах. 2019: Краткий статистический сборник. Росстат. М., 2019. 549 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.gks.ru/storage/mediabank/rus19.pdf>
2. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы. Программа реновации в цифрах и фактах [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://stroim.mos.ru/mobile/infographics?tag=реновация+жилых+кварталов&slug=programma-rienovatsii-v-tsifrah-i-faktakh>
3. Larsen O.A., Samchenko S.V., Naruts V.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow // Proceedings of the XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2019. № 19. Issue 6.2. Pp. 115–122.
4. Ларсен О.А., Дмитриев Н.С., Наруть В.В., Швецова В.А. Повышение эффективности бетонов с использованием рециклингового заполнителя // Техника и технология силикатов. 2019. Том 26. №2. С. 46–52.
5. Гусев Б.В., Загурский В.А. Вторичное использование бетонов. М.: Стройиздат, 1988. 97 с.
6. Гусев Б.В., Кудрявцева В.Д. Дробление железобетонных изделий и вторичное использование бетона // Техника и технология силикатов. 2013. Т. 20. № 2. С. 25–28.
7. Абдуллаев М.А.В., Абдуллаев А.М. Разработка нового вяжущего на основе отходов дробления бетонного лома и исследование его основных свойств // Актуальные проблемы современного материаловедения Сборник докладов. Грозный. 2015. С. 33–39.
8. Головин Н.Г., Алимов Л.А., Воронин В.В. Использование отсева дробления бетонного лома // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 9 (80). С. 26–27.
9. Flora F., Mariano A.Z., Katya B., Carlo P. Valorization of co-combustion fly ash in concrete production // Materials Design. 2015. № 85. Pp. 687–694.
10. Majhi R.K., Nayak A.N., Mukharjee B.B. Development of sustainable concrete using recycled

coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag // Construction and Building Materials. 2018. № 159. Pp. 417–430.

11. Jin R., Q Chen., Soboyejo A. Survey of the current status of sustainable concrete production in the U.S // Resources, Conservation and Recycling. 2015. № 105. Part A. Pp. 148–159.

12. Pereira-de-Oliveira L.A., Nepomuceno M.C.S., Castro-Gomes J.P., Vila M.F.C. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregate // Construction and Building Materials. 2014. № 51. Pp. 113–120.

13. Grdic Z.J., Toplicic-Curcic G.A., Despotovic I. Ristic M., N.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate // Construction and Building Materials. 2010. № 24. Pp. 1129–1133.

14. Воронин В.В., Алимов Л.А., Балакшин А.С. Малоцементные бетоны на щебне из бетонного лома // Технология бетонов. 2010. № 3. С. 28.

15. Балакшин А. С. Свойства малоцементного бетона с органоминеральной добавкой на основе отсеков дробления бетонного лома // Вестник МГСУ. 2011. № 1. С. 253–258.

16. Modani P.O., Mohitkar V. Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solution for sustainable development // International Journal of Civil Structural Engineering. 2014. № 4. Pp. 430–440.

17. Наруть В. В., Ларсен О. А. Оценка качества продуктов дробления бетонного лома для его применения в технологии бетона // Бюллетень строительной техники. 2018. № 10. С. 47–49.

18. Баженов Ю.М., Горчаков Г.И., Алимов Л.А., Воронин В.В. Получение бетонов заданных свойств. М.: Стройиздат, 1978. 53 с.

19. Alimov L., Voronin V., Larsen O., Koryuyakov V. Effect of the structural characteristics on frost resistance of concrete // Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. № 692. Pp. 601–607.

Информация об авторах

Ларсен Оксана Александровна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: larsen.oksana@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Наруть Виталий Викторович, аспирант кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: insolent88@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Самченко Светлана Васильевна, доктор технических наук, профессор кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: samchenko@list.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Александрова Ольга Владимировна, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: aleks_olvl@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Булгаков Борис Игоревич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии вяжущих веществ и бетонов. E-mail: fakultetst@mail.ru. Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. Россия, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Поступила 24.01.2020.

© Наруть В.В., Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И., 2020

Naruts V.V., *Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I.

National Research Moscow State University of Civil Engineering

**E-mail: larsen.oksana@mail.ru*

USE OF STRUCTURAL CHARACTERISTICS IN SELF-COMPACTING CONCRETE MIX DESIGN WITH RECYCLED CONCRETE AGGREGATES

Abstract. Huge amount of recycled concrete is formed when dismantling of buildings. The paper describes an efficient application of recycled concrete aggregates and concrete grinding fines to obtain technological, economic and ecological benefits. The possibility of effective application as materials for self-compacting concrete with the use of crushed concrete and recycled concrete fines is shown. The use of filler in self-compacting concrete mixtures obtained by activation of concrete grinding fines with polycarboxylate-based superplasticizer is shown. This paper presents the results of research of self-compacting concrete produced with

recycled concrete aggregates and activated filler. The physical and mechanical characteristics of coarse aggregate, grain distribution of aggregates and sand proportion in aggregate mix, design of self-compacting concrete mixture and its structure properties with use mathematical experiment planning method were carried out. This method applies in the design of the self-compacting concrete mixture by solving the system of equations. The equations obtained by corresponding mathematical models. The obtained mathematical models include argumentative characteristics defined by the end of structure formation. The optimal content of filler in self-compacting concrete mixture is determined. The optimal grinding mode of the equipment with specified specific surface area of the filler is obtained. The grain-size composition of mixture consisting of quartz sand and crushed concrete aggregate with fraction of 5–10 mm based on term of maximum approximation to the Fuller ideal gradation curve is designed.

Keywords: *self-compacting concrete, recycled concrete, recycled concrete aggregates, activated filler, granulometry, structural characteristics.*

REFERENCES

1. Russia in numbers. 2019: Short statistical collection. Rosstat. Moscow [Rossiya v cifrah. 2019: Kratkij statisticheskiy sbornik. Rosstat], 2019. 549 p. [access Mode: <https://www.gks.ru/storage/mediabank/rus19.pdf> (rus)]
2. Complex of urban planning policy and construction of the city of Moscow. Renovation program in figures and facts [Kompleks gradostroitel'noj politiki i stroitel'stva goroda Moskvyy. Programma renovacii v cifrah i faktah] access Mode: <https://stroj.mos.ru/mobile/infographics?tag>
3. Larsen O.A., Samchenko S.V., Naruts V.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow. Proceedings of the XIX International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2019. Vol. 19. Iss. 6.2. Pp. 115–122.
4. Larsen O.A., Dmitriev N.S., Naruts V.V., Shvetsova V.A. Improvement the efficiency of concrete with recycled aggregates [Povyshenie effektivnosti betonov s ispol'zovaniem reciklingovogo zapolnitelya]. Technique and technology of silicates. 2019. Vol. 26. No. 2. Pp. 46–52. (rus)
5. Gusev B.V., Zagursky V.A. Secondary use of concrete [Vtorichnoe ispol'zovanie betonov]. Moscow: Stroizdat. 1988, 97 p. (rus)
6. Gusev B.V., Kudryavtseva V.D. Crushing of reinforced concrete products and secondary use of concrete [Drobleniye zhelezobetonnyh izdelij i vtorichnoe ispol'zovanie betona]. Technique and technology of silicates. 2013. Vol. 20. No. 2. Pp. 25–28. (rus)
7. Abdullaev M.A.V., Abdullaev A.M. Development of a new binder based on crashed concrete waste and research of its main properties [Razrabotka novogo vyazhushchego na osnove othodov drobleniya betonnoogo loma i issledovanie ego osnovnyh svoystv]. Actual problems of modern materials science Sbornik dokladov. Grozny. 2015. Pp. 33–39. (rus)
8. Golovin N.G., Alimov L.A., Voronin V.V. Use of fines from recycled crashed concrete [Iskol'zovanie otsevvov drobleniya betonnoogo loma]. Construction materials, equipment, technologies of the XXI century. 2005. No. 9 (80). Pp. 26–27. (rus)
9. Flora F., Mariano A.Z., Katya B., Carlo P. Valorization of co-combustion fly ash in concrete production. Materials Design. 2015. Vol. 85. Pp. 687–694.
10. Majhi R.K., Nayak A.N., Mukharjee B.B. Development of sustainable concrete using recycled coarse aggregate and ground granulated blast furnace slag. Construction and Building Materials. 2018. Vol. 159. Pp. 417–430.
11. Jin R., Chen Q., Soboyejo A. Survey of the current status of sustainable concrete production in the U.S. Resources, Conservation and Recycling. 2015. Vol. 105. Part A. Pp. 148–159.
12. Pereira-de-Oliveira L.A., Nepomuceno M.C.S., Castro-Gomes J.P., Vila M.F.C. Permeability properties of self-compacting concrete with coarse recycled aggregate. Construction and Building Materials. 2014. Vol. 51. Pp. 113–120.
13. Grdic Z.J., Toplicic-Curcic G.A., Despotovic I., Ristic M., N.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials. 2010. Vol. 24. Pp. 1129–1133.
14. Voronin V.V., Alimov L.A., Balakshin A.S. Concrete with low content of crashed concrete coarse aggregate [Maloshchebenochnye betony na shchebne iz betonnoogo loma]. Concrete Technology. 2010. No. 3. Pp. 28–29. (rus)
15. Balakshin A.S. Properties of low-grade concrete with an organomineral additive based on waste recycled concrete [Svoystva maloshchebenochnogo betona s organomineral'noj dobavkoj na osnove otsevvov drobleniya betonnoogo loma]. Vestnik MGSU. 2011. No. 1. Pp. 253–258. (rus)
16. Modani P.O., Mohitkar V. Self-compacting concrete with recycled aggregate: a solution for sustainable development. International Journal of Civil Structural Engineering. 2014. Vol. 4. Pp. 430–440.
17. Naruts V.V., Larsen O.A. Assessment of the quality of crashed concrete products for their application in concrete technology [Ocenka kachestva produktov drobleniya betonnoogo loma]

dlya ego primeneniya v tekhnologii betona]. BST: Bulletin of building equipment. 2018. No. 10. Pp. 47–49. (rus)

18. Bazhenov Yu.M., Gorchakov G.I., Alimov L.A., Voronin V.V. Concrete with specified properties [Poluchenie betonov zadannyh svojstv].

Moscow: Stroizdat, 1978. 53 p. (rus)

19. Alimov L., Voronin V., Larsen O., Korovyakov V. Effect of the structural characteristics on frost resistance of concrete. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2018. Vol. 692. Pp. 601–607.

Information about the authors

Larsen, Oksana A. PhD, Assistant professor. E-mail: larsen.oksana@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Naruts, Vitaly V. Postgraduate student. E-mail: insolent88@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Samchenko, Svetlana V. DSc, Professor. E-mail: samchenko@list.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Aleksandrova, Olga V. PhD, Assistant professor. E-mail: aleks_olvl@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Bulgakov, Boris I. PhD, Assistant professor. E-mail: fakultetst@mail.ru. National Research Moscow State University of Civil Engineering. Russia, 129337, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26.

Received 24.01.2020

Для цитирования:

Наруть В.В., Ларсен О.А., Самченко С.В., Александрова О.В., Булгаков Б.И. Разработка составов самоуплотняющегося бетона на основе бетонного лома с использованием структурных характеристик // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 4. С. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16

For citation:

Naruts V.V., Larsen O.A., Samchenko S.V., Aleksandrova O.V., Bulgakov B.I. Use of structural characteristics in self-compacting concrete mix design with recycled concrete aggregates. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2020. No. 4. Pp. 8–16. DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-4-8-16