



УДК 691.32

Богданов Руслан Равильевич

ассистент

E-mail: bogdanov.r.r@yandex.ru

Ибрагимов Руслан Абдирашитович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: rusmag007@yandex.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Королев Евгений Валерьевич

доктор технических наук, профессор

E-mail: korolev@nocnt.ru

НИУ Московский государственный строительный университет

Адрес организации: 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона

Аннотация

Постановка задачи. Цель исследования – определить оптимальный фракционный состав смеси заполнителей, обеспечивающей достижение максимальной насыпной плотности и пригодной для самоуплотняющегося бетона.

Результаты. Основные результаты исследования заключаются в определении фракционного состава заполнителей для самоуплотняющегося бетона, предназначенного для гидроизоляции плоских кровель. Для решения сформулированной задачи применялись математические методы планирования активного эксперимента, а именно, симплекс-решетчатый план. Установлено, что максимальной насыпной плотностью обладает смесь, состоящей: крупный заполнитель (щебень) фракции 5-10 мм – 48 %; обогащенный мелкий заполнитель (крупный песок) фракции 0,16-5 мм – 16 %; мелкий заполнитель (мелкий песок) фракции 0,16-0,63 мм – 36 %. При этом максимальная насыпная плотность и плотность упаковки частиц смеси заполнителей составила, соответственно, 1840 кг/м³ и 0,82.

Выводы. Значимость результатов работы для строительного материаловедения заключаются в расширении представлений о формировании плотных упаковок на рассмотренную рецептурную систему, характеризующуюся собственными физическими (вещественными и геометрическими) параметрами, а также в установлении зависимости, демонстрирующей локальные преимущества одновременного применения как непрерывной, так и прерывистой гранулометрии. Значимость результатов работы для строительной отрасли заключается в установлении оптимального соотношения смеси заполнителей, позволяющего получить самоуплотняющиеся бетоны с высокими физико-техническими свойствами.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон, фракционный состав, математическое планирование эксперимента, плотность упаковки, насыпная плотность, симплекс-решетчатый план, заполнитель

Введение

При проектировании состава самоуплотняющегося бетона (СУБ) важной является задача получения оптимального гранулометрического состава смеси с целью обеспечения наиболее плотной упаковки зерен [1-7]. Данная задача решается двумя способами: 1) через получение «идеальной» кривой рассева заполнителей; 2) смешивание трех и более видов крупного и мелкого заполнителей [8, 9]. На практике чаще применяется второй способ, ввиду его меньшей трудоемкости по сравнению с первым способом.

Непрерывные кривые рассева дисперсных систем, обеспечивающие наибольшую плотность упаковки, принято считать эталонными [8]. В качестве примера «идеальных»

кривых можно привести кривые просеивания, предложенные Фуллером (1907) или Андреасеном (1930), уравнение которых имеет вид:

$$\frac{G_{np}}{100} = \frac{X^n}{D_{max}^n}, \quad (1)$$

где G_{np} – проход, %, через сито размером X , мм; D_{max}^n – наибольшая крупность зерна в смеси; n – коэффициент распределения, равный по Фуллеру 0,5, по Андреасену (для пространственного распределения) – 0,37. Или кривые просеивания, предложенные Функом и Дингером (1994), уравнение которых имеет вид:

$$\frac{G_{np}}{100} = \frac{X^n - D_{min}^n}{D_{max}^n - D_{min}^n}, \quad (2)$$

где D_{min}^n – наименьшая крупность зерна в смеси, мм [8].

Особенностью расчета гранулометрического состава СУБ, является то, что идет построение совместной кривой просеивания крупного и мелкого заполнителей, с целью приближения к «идеальной» кривой просеивания [8]. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**

Для оптимизации состава смеси заполнителей способ с построением с получением «идеальной» кривой отсева заполнителей требует тщательную классификацию исходных сырьевых компонентов и проведение соответствующих испытаний [8], что затрудняет его применение на практике с учетом имеющейся производственной базы. В данном случае наиболее доступным, менее трудоемким является второй способ, заключающийся в смешении различных компонентов заполнителей известного фракционного состава, при этом оптимизация состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона, может быть выполнена с применением методов математического планирования (например, методом симплекс-решетчатого плана) [9]. В связи с этим возникает задача по разработке состава самоуплотняющегося бетона для гидроизоляции плоской кровли и определения фракционного состава заполнителей при условии достижения максимальной насыпной плотности и плотности упаковки частиц.

Цель работы – установление влияния содержания разноразмерных частиц заполнителя на насыпную плотность и плотность упаковки их смеси, а также определение оптимального фракционного состава смеси заполнителей, пригодной для самоуплотняющегося бетона.

Методы, материалы и оборудование, применяемые в исследовании

При проведении экспериментальных исследований в качестве основных исходных компонентов использовались: портландцемент (ПЦ) ЦЕМ II/A-K (Ш-П) 32,5Б ГОСТ 31108-2016 производства ЗАО «Ульяновскцемент»; в качестве мелкого заполнителя песок производства ЗАО «Кулонстрой» с модулем крупности $M_k=2,79$ фракции 0,16-5 мм и песок с прерывистым зерновым составом имеющим модуль крупности $M_k=1,54$ фракции 0,16-0,63 мм, отвечающие требованиям ГОСТ 8736-2014; в качестве крупного заполнителя использовали щебень из плотных горных пород производства ООО «Неруд-инвест» (Челябинская область, г. Сатка) фракции 5-10 мм отвечающий требованиям ГОСТ 8267-93; в качестве активной минеральной добавки (АМД) использовали метакраин – аморфный силикат алюминия месторождения Журавлиный Лог (ТУ 5729-095-51460677-2009); химические добавки: гиперпластификатор (ГП) «Remicrete SP 10» и гидрофобизатор (ГФ) «Типром С»; в качестве дисперсного армирования использовали – стальную фибру «Челябинка» (длина фибры 36-38 мм).

Определение насыпной плотности заполнителей проводили согласно ГОСТ 9758 – 2012. Определение подвижности растворов смесей осуществлялось по ГОСТ 310.4, а средней плотности ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний». Определение средней плотности, расслаиваемости, пористости, температуры, объема вовлеченного воздуха, сохраняемости свойств во времени бетонной смеси выполняли по ГОСТ 10181-2014 «Смеси бетонные. Методы испытаний», определение удобоукладываемости и вязкости самоуплотняющейся бетонной смеси выполняли по ГОСТ Р 57833-2017 «Часть 8. Самоуплотняющаяся бетонная смесь. Испытание на распыл». Определение средней плотности бетона производилось по ГОСТ 12730.1-78 «Бетоны. Методы определения плотности».

Оптимизация состава смеси крупного и мелкого заполнителей для самоуплотняющегося бетона выполнена методом симплекс-решетчатого плана и вероятностно-статистической обработки полученных данных. Полученные данные обрабатывались в программном комплексе Statistica 13.2.

Результаты исследования

В соответствии с рекомендациями СП 70.13330 (п.5.2.5), наибольшая крупность заполнителя для тонкостенных конструкций должна быть не более $1/2-1/3$ толщины конструкции. Следовательно, при устройстве кровли по конструкции [10] оптимальная крупность заполнителя составляет не более 10 мм.

Для оптимизации гранулометрического состава смеси заполнителей принят второй способ (смешивание трех и более видов крупного и мелкого заполнителей), ввиду его меньшей трудоемкости. Вначале определен оптимальный гранулометрический состав (по критерию оптимальной упаковки заполнителя) двухкомпонентной системы состоящей из щебня фракции 5-10 мм и обогащенного песка фракции 0,16-5 мм. Для выбора оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей построена зависимость плотности упаковки смеси от доли песка в смеси заполнителей (r) (рис. 1).

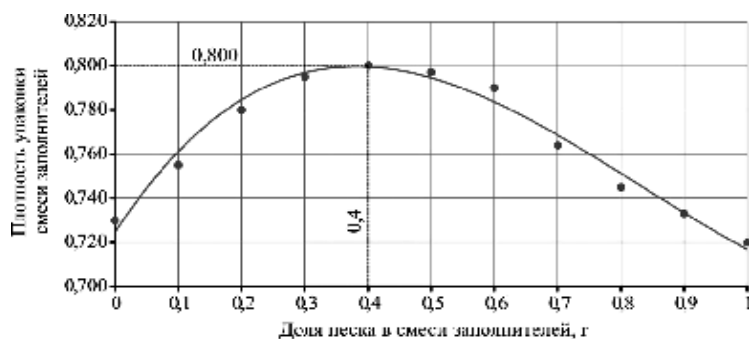


Рис. 1. Зависимость плотности упаковки двухкомпонентной системы от доли обогащенного песка фракции 0,16-5 мм в смеси (иллюстрация авторов)

Из рис. 1 видно, что наибольшая плотность упаковки частиц (0,80) достигается при содержании обогащенного песка $r = 0,4$. При этом насыпная плотность смеси составила 1805 кг/м^3 .

Для увеличения плотности смеси необходимо введение мелкого песка фракции 0,16-0,63 мм.

Оптимизация состава смеси заполнителей, для самоуплотняющегося бетона, выполнена методом симплекс-решетчатого плана. Областью изучения оптимизации содержания трех заполнителей является треугольник (рис. 2).

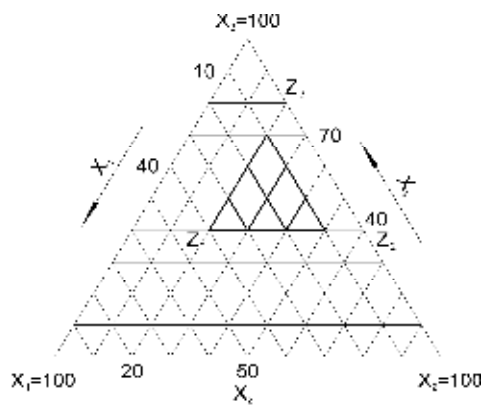


Рис. 2. Уточненная зона поиска оптимального значения соотношения компонент смеси (иллюстрация авторов)

Каждая сторона этого треугольника (рис. 2) отображает состав частиц, сумма которых равна единице:

$$X_1 + X_2 + X_3 = 1,$$

где X_1 – песок фракции 0,16-0,63 мм; X_2 – песок фракции 0,16-5 мм; X_3 – щебень фракции 5-10 мм.

На основе выявленного оптимального содержания крупного и мелкого заполнителей двухкомпонентной смеси, а также согласно данным полученным в работах [2, 4, 8, 9] принимаем следующий упрощенный диапазон для состава заполнителей:

$$X_1 = 10 \div 40 \%,$$

$$X_2 = 20 \div 50 \%,$$

$$X_3 = 40 \div 70 \, \%.$$

Координаты зоны, обозначенные Z :

$Z_1(0,40;0,20;0,40)$; $Z_2(0,00;0,60;0,40)$; $Z_3(0,00;0,20;0,80)$.

Полученные в результате эксперимента значения насыпной плотности и плотности упаковки смеси заполнителей приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения определения уравнений регрессии

№ п/п	Знак Y	Соотношение компонентов			Насыпная плотность, ρ_{cp} , кг/м ³	Плотность упаковки, (ϕ)
		Z_1 0,16-0,63	Z_2 0,16-5	Z_3 5-10		
1	Y_1	1	0	0	1795	0,795
2	Y_2	0	1	0	1825	0,800
3	Y_3	0	0	1	1810	0,797
4	Y_4	0,5	0,5	0	1830	0,807
5	Y_5	0,5	0	0,5	1805	0,800
6	Y_6	0	0,5	0,5	1825	0,810
7	Y_7	0,6	0,2	0,2	1825	0,800
8	Y_8	0,2	0,6	0,2	1840	0,820
9	Y_9	0,2	0,2	0,6	1830	0,797
10	Y_{10}	0,333	0,333	0,333	1835	0,812

Матрица эксперимента (табл. 1) включает три компонента смеси: Z_1 – песок фракции 0,16-0,63 мм; Z_2 – песок фракции 0,16-5 мм; Z_3 – щебень фракции 5-10 мм.

Диаграмма для определения оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей по плотности упаковки заполнителей приведена на рис. 3.

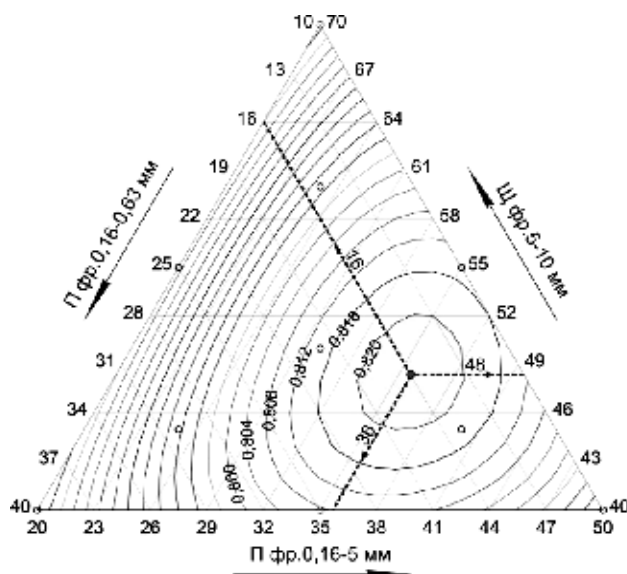


Рис. 3. Диаграмма для определения оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей по плотности упаковки заполнителей (иллюстрация авторов)

Произведена обработка результатов математического планирования, которая позволила получить математические зависимости (3) и (4).

$$\rho = 1795,5 \cdot X_1 + 1825,06 \cdot X_2 + 1810,97 \cdot X_3 + 81,15 \cdot X_1 \cdot X_2 + 12,97 \cdot X_1 \cdot X_3 + 32,06 \cdot X_2 \cdot X_3 + 407,65 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (3)$$

Зависимость плотности упаковки от содержания заполнителей:

$$\phi = 0,794 \cdot X_1 + 0,803 \cdot X_2 + 0,795 \cdot X_3 + 0,0418 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,009 \cdot X_1 \cdot X_3 + 0,047 \cdot X_2 \cdot X_3 + 0,068 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (4)$$

Анализ диаграммы (рис. 3), уравнений регрессии (3) и (4) позволил определить оптимальную область соотношения крупного и мелких заполнителей, при следующем содержании: щебень фракции 5-10 мм – 48 %; обогащенный песок фракции 0,16-5 мм – 36 %; мелкий песок фракции 0,16-0,63 мм – 16 %.

Подбор состава СУБ производится на основании принципов, таких же, как и для подбора обычных бетонов с учетом особенностей, а именно, обязательное использование пластифицирующих добавок и дополнительные требования к качеству и количеству компонентов смеси. Дополнительные требования к компонентам смеси: портландцемент с содержанием C_3A не более 8 %, соответствующий ГОСТ 31108; песок с модулем крупности $M_k=1,1-3$, соответствующий ГОСТ 8736; крупный заполнитель фракции не более 20 мм, соответствующий ГОСТ 8267. В качестве добавок использовали пластификатор, соответствующий ГОСТ 24211; минеральные добавки, соответствующие ГОСТ Р 56592, включая активные минеральные добавки. В качестве компонента, повышающего сегрегационную устойчивость, может применяться полипропиленовая фибра.

Подбор состава СУБ выполнен согласно рекомендациям НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» подбора состава СУБ [11], определен состав СУБ, расход цемента. Выявлено, что минимальный расход портландцемента для достижения требуемой подвижности (расплыв конуса в пределах 550-650 мм, соответствует классу SF1 (EN 12350-8)) без расслоения СУБС составляет 450 кг/м³. На основании полученной зависимости (рисунок 3) для получения оптимального гранулометрического состава смеси заполнителей доля щебня в смеси заполнителей составляет 900 кг/м³, песка фракции 0,16-5 мм – 600 кг/м³, песка фракции 0,16-0,63 мм – 300 кг/м³.

Состав полученной самоуплотняющейся бетонной смеси представлен в табл. 2

Таблица 2

Состав бетонной смеси, кг/м³

ПЦ	Щ	П1	П2	МтК	ГП	ГФ	Ф1	Ф2	В
450	905	300	595	22,5	6,75	0,675	36	2,7	170

Примечания: ПЦ – портландцемент; МтК – метакаолин; П1 – песок фр. 0,16-0,63 мм; П2 – песок фр. 0,16-5 мм; Щ – щебень; ГП – гиперпластификатор; ГФ – гидрофобизатор; Ф1 – фибра «Челябинка»; Ф2 – фибра ВСМ 18 мм; В – вода

Определены основные технологические свойства самоуплотняющейся бетонной смеси, испытания проведены в соответствии с ГОСТ 10181-2014 и ГОСТ Р 57833-2017. Результаты испытаний приведены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства самоуплотняющейся бетонной смеси

Характеристика	Показатель
Плотность, кг/м ³	2470
Расплыв определенный по EN 12350-8, мм	600-640
Класс удобоукладываемости по распылу для СУБ	SF1
Класс вязкости t_{500}	VS2
Расслаиваемость:	
Раствороотделение, %	2,7
Водоотделение, %	0,45
Сохраняемость свойств, мин	120

Как видно из результатов, приведенных в таблице 3, разработанный СУБ имеет высокую устойчивость к расслоению, о чем свидетельствует низкое раствооротделение и водоотделение.

Определены физико-механические свойства разработанного самоуплотняющегося бетона. Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические свойства СУБ

Характеристика	Показатель
Плотность, кг/м ³	2470
Предел прочности при сжатии в возрасте 3сут., МПа	42,5
Предел прочности при сжатии в возрасте 7сут., МПа	56,9
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут., МПа	64,62
Удельный предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут., отнесенный к расходу портландцемента, МПа/кг	0,14
Предел прочности на растяжение при изгибе в возрасте 28сут., МПа	8,97
Критический коэффициент интенсивности напряжений	1,86
Модуль упругости, 10 ³ МПа	39,38
Марка по водонепроницаемости	W16
Водопоглощение по массе, %	1,48
Марка по морозостойкости	F600
Усадка, мм/м	0,2
Коэффициент линейного расширения бетона, 10 ⁻⁵ ·°C ⁻¹	0,8
Показатели пористости:	
- полный объем пор, %	8,48
- объем открытых капиллярных пор, %	3,65
- объем условно-закрытых пор, %	3,14

Получение высокой марки по морозостойкости F600 объясняется синергетическим действием компонентов комплексного модификатора. Происходит повышение плотности бетона за счет действия пластификатора, резко снижающего В/Ц при сохранении подвижности, и метакаолина, способствующему уплотнению структуры бетона и образованию низкоосновных гидросиликатов кальция, более стабильных при циклических воздействиях «замораживание – оттаивание» [12]. Важную функцию выполняет гидрофобизатор за счет резкого увеличения гидрофобности стенок пор и капилляров бетона (Буланов П.Е., Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф., Строганов В.Ф. Оптимизация состава и исследование влияния комплексной гидрофобно-пластифицирующей добавки на физико-технические свойства, укрепленных портландцементом, глинистых грунтов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4 (42). С. 376-383). Также уменьшается средний размер пор, что в совокупности с их гидрофобностью существенно повышает непроницаемость бетона: наблюдается снижение массопоглощения жидкости.

Заключение

1. Определен оптимальный состав смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона, предназначенного для гидроизоляции плоских кровель: щебень фракции 5-10 мм – 48 %; обогащенный песок фракции 0,16-5 мм – 16 %; мелкий песок фракции 0,16-0,63 мм – 36 %. При указанных соотношениях фракций смесь заполнителей обладает максимальной насыпной плотностью и плотностью упаковки частиц – 1840 кг/м³ и 0,82, соответственно.

2. Установленные зависимости плотности упаковки и насыпной плотности смеси заполнителей от их содержания количества расширяют представления о формировании плотных упаковок на рассмотренную рецептурную систему, характеризующуюся собственными физическими (вещественными и геометрическими) параметрами, также установленные зависимости, демонстрируют локальные преимущества в одновременном

применении как непрерывной, так и прерывистой гранулометрии. Кроме того, полученные зависимости позволяют получить самоуплотняющиеся бетоны с высокими физико-техническими свойствами с минимальными трудозатратами из имеющейся материально-сырьевой базы.

3. Определены основные технологические свойства самоуплотняющейся бетонной смеси (средняя плотность – 2470 кг/м³, раствороотделение 2,7 %, водоотделение – 0,45 %, сохраняемость свойств во времени бетонной смеси – 120 мин, класс удобоукладываемости по распылу – SF1, класс вязкости t_{500} – VS2) и физико-механические свойства полученного бетона (прочность – 64,62 МПа, модуль упругости – 39,38 ГПа, трещиностойкость – ККИН 1,86 и относительная усадка – $0,2 \times 10^{-3}$). Установлены показатели СУБ, определяющие его долговечность: морозостойкость – F600, водонепроницаемость – W16.

Список библиографических ссылок

1. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Advanced Concrete Technology. 2003. № 1. P. 5–15.
2. Adekunle S. K., Ahmad S., Maslehuddin M. The effect of aggregate packing on the performance of SCC using dune sand // Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, Illinois, USA, May 12–15, 2013 – Adekunle, Ahmad & Maslehuddin.
3. Collepardi M. Self Compacting concrete: what is new? // Proc. IV International Conference. Ottawa (Canada), 2004. P. 13–19.
4. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate // Cement and Concrete Research. 1985. Vol. 15. № 2. P. 253–260.
5. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л., Марчук В. В. Самоуплотняющиеся цементно-зольные бетоны // Технологии бетонов. 2014. № 4 (93). С. 24–27.
6. Каприелов С. С., Травуш В. И., Карпенко Н. И., Шейнфельд А. В., Кардумян Г. С., Киселева Ю. А., Пригоженко О. В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити» // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 13–18.
7. Морозов Н. М., Хозин В. Г., Красникова Н. М. Структурные особенности высокопрочных песчаных бетонов // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2017. № 2 (990). С. 46–48.
8. Белов В. В., Смирнов М. А. Инновационные решения в технологии высокотехнологических бетонов: статья // Вестник Тверского государственного технического университета. Вып. 17 / Тверской ГТУ. Тверь, 2010. С. 126–131.
9. Баженов Ю. М., Воронин В. В., Алимов Л. А., Бахрах А. М., Ларсен О. А., Соловьев В. Н., Нгуен Д. В. К. Высококачественные самоуплотняющиеся бетоны с использованием отходов сжигания угля // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. № 12 (111). С. 1385–1391.
10. Bogdanov R. R., Ibragimov R. A. Development of flat roof construction with waterproofing from modified self-compacting concrete // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 262 (2017) 012012 doi:10.1088/1757-899X/262/1/012012.
11. Рекомендации по подбору составов бетонных смесей для тяжелых и мелкозернистых бетонов. Методическое пособие / Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации Федеральное автономное учреждение «Федеральный центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в строительстве». М., 2016. 100 с.
12. Ibragimov R. A., Bogdanov R. R. The influence of a complex modifying agent on the hydration and structure formation of self-compacting concrete // ZKG: Zement – Kalk – Gips International. 2017. Т. 70. № 4. С. 44–49.

Bogdanov Ruslan Ravil'evich

assistant

E-mail: bogdanov.r.r@yandex.ru**Ibragimov Ruslan Abdirashitovich**

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: rusmag007@yandex.ru**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Korolev Evgeny Valer'evich

doctor of technical sciences, professor

E-mail: korolev@nocnt.ru**NRU Moscow State University of Civil Engineering**

The organization address: 129337, Russia, Moscow, Yaroslavskoe shosse, 26

**Optimization of the fractional composition of the aggregate mixture
for self-compacting concrete****Abstract**

Problem statement. The aim of the study was to determine the optimal fractional composition of aggregates for self-compacting concrete, provided that the maximum bulk density and particle packing density were achieved.

Results. The main results of the study are to determine the fractional composition of aggregates for self-compacting concrete, designed for waterproofing flat roofs. To solve the formulated problem, mathematical methods of planning an active experiment were used, namely, a simplex-lattice plan. It was found that the mixture has the maximum bulk density, consisting of: coarse aggregate (crushed stone) fraction 5-10 mm – 48 %; enriched fine aggregate (coarse sand) of a fraction of 0,16-5 mm – 16 %; fine aggregate (fine sand) fractions of 0,16-0,63 mm – 36 %. In this case, the maximum bulk density and packing density of the particles of the aggregate mixture were 1840 kg/m³ and 0,82, respectively.

Conclusions. The significance of the results of the work for building materials science lies in the expansion of ideas about the formation of dense packaging for the considered recipe system, characterized by its own physical (material and geometric) parameters, as well as in establishing a relationship that demonstrates the local advantages of the simultaneous use of both continuous and discontinuous granulometry. The significance of the results of the work for the construction industry lies in establishing the optimal ratio of the mixture of aggregates, which allows to obtain self-compacting concrete with high physical and technical properties.

Keywords: self-compacting concrete, fractional composition, mathematical design of the experiment, packing density, bulk density, simplex-lattice plan, aggregate.

References

1. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Advanced Concrete Technology. 2003. № 1. P. 5–15.
2. Adekunle S. K., Ahmad S., Maslehuddin M. The effect of aggregate packing on the performance of SCC using dune sand // Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete, Chicago, Illinois, USA. 2013. P. 12–15.
3. Collepardi M. Self Compacting concrete: what is new? // Proc. IV International Conference. Ottawa (Canada), 2004. P. 13–19.
4. Piasta J. Rheological Properties of Concretes with Fine Aggregate // Cement and Concrete Research. 1985. Vol. 15. № 2. P. 253–260.
5. Dvorkin L. I., Dvorkin O. L., Marchuk V. V. Self-compacting cement-ash concrete // Tekhnologii betonov. 2014. № 4 (93). P. 24–27.

6. Kaprielov S. S., Travush V. I., Karpenko N. I., Sheinfeld A. V., Kardumyan G. S., Kiseleva Yu. A., Prigozhenko O. V. Modified concretes of a new generation in the constructions of the Moscow City Business Center // *Stroitel'nye materialy*. 2006. № 10. P. 13–18.
7. Morozov N. M., Khozin V. G., Krasnikova N. M. Structural features of high-strength sandy concrete // *BST: Byulleten' stroitel'noj tekhniki*. 2017. № 2 (990). P. 46–48.
8. Belov V. V., Smirnov M. A. Innovative solutions in the technology of high-tech concrete // *Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. Vol. 17. 2010. P. 126–131.
9. Bazhenov Yu. M., Voronin V. V., Alimov L. A., Bahrakh A. M., Larsen O. A., Soloviev V. N., Nguyen D. V. K. High-quality self-compacting concrete using coal combustion waste // *Vestnik MGSU*. 2017. Vol. 12. № 12 (111). P. 1385–1391.
10. Bogdanov R. R., Ibragimov R. A. Development of flat roof construction with waterproofing from modified self-compacting concrete // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering* 262 (2017) 012012 doi:10.1088/1757-899X/262/1/012012.
11. Recommendations on the selection of concrete mixes for heavy and fine concrete. Methodical manual / Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii Federal'noe avtonomnoe uchrezhdenie «Federal'nyj centr normirovaniya, standartizacii i ocenki sootvetstviya v stroitel'stve». M., 2016. 100 p.
12. Ibragimov R. A., Bogdanov R. R. The influence of a complex modifying agent on the hydration and structure formation of self-compacting concrete // *ZKG: Zement – Kalk – Gips International*. 2017. T. 70. № 4. P. 44–49.