

МАТЕРИАЛЫ

Научная статья

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>

EDN: ARNNFZ

Влияние доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей

А. О. Смирнов^{1✉}, Л. М. Добшиц², С. Н. Анисимов¹, А. Ю. Лешканов¹

¹Поволжский государственный технологический университет (г. Йошкар-Ола)

²Российский университет транспорта (МИИТ) (г. Москва)

SmirnovAO@volgatech.net✉

Аннотация. *Введение.* Использование в современном монолитном строительстве самоуплотняющихся бетонных смесей позволяет существенно сократить трудо- и энергозатраты на их укладку, повысить качество поверхности изготавливаемых конструкций, а также ускорить темпы строительства. Самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются от других видов особыми требованиями к подбору состава бетона, повышенным расходом цемента и высокой стоимостью. Одной из основных задач подбора рациональных составов бетонных смесей является определение соотношения компонентов, обеспечивающего минимальный расход цемента при достижении требуемых физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов. Для получения высокоподвижных самоуплотняющихся бетонных смесей важно учитывать, чтобы объём цементного теста превышал объём пустот между зёрнами заполнителей для обеспечения необходимой раздвижки зёрен и снижения трения между ними.

Цель исследования – определение наиболее эффективного соотношения мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей, при котором достигаются минимальная пустотность заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов.

Материалы и методы. В качестве мелкого заполнителя использовался природный кварцевый песок с модулем крупности 1,9, крупного – щебень из плотных горных пород фракции 5-20 мм. Составы самоуплотняющихся бетонных смесей подбирались из условия получения смесей с маркой по удобоукладываемости РК2 (расплыв стандартного конуса 66...75 см) с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021.

Результаты исследования. Минимальная пустотность смеси заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов достигаются при массовой доле песка $g = 0,45$. Уменьшение количества песка приводит к появлению признаков расслоения и водоотделения самоуплотняющихся бетонных смесей, ухудшению структуры, снижению прочности бетонов и повышению их капиллярной пористости. Увеличение доли песка позволяет повысить стабильность, увеличить вязкость самоуплотняющихся бетонных смесей при снижении их удобоукладываемости, что приводит к уменьшению капиллярной пористости бетонов, но снижает их прочность.

Выводы. Установлены закономерности влияния доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов. Наиболее эффективным соотношением мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей является соотношение $g = 0,45$.

Ключевые слова: самоуплотняющийся бетон; доля песка в смеси заполнителей; пустотность заполнителей; удобоукладываемость; расслаиваемость; вязкость; прочность; водопоглощение.

Финансирование: авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Для цитирования: Влияние доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей / А. О. Смирнов, Л. М. Добшиц, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2024. № 1 (29). С. 7–17. DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>; EDN: ARNNFZ

Введение

Проблема повышения качества строительных материалов и конструкций, а также внедрения в строительный комплекс ресурсо- и энергосберегающих технологий является актуальной в современном строительстве. Так, в последние годы в современном монолитном строительстве находят широкое применение самоуплотняющиеся бетоны. Обладая повышенной удобоукладываемостью и текучестью, самоуплотняющиеся бетонные смеси способны растекаться под действием собственного веса и заполнять густоармированные конструкции без каких-либо внешних механических воздействий. Использование данных бетонных смесей позволяет существенно сократить трудо- и энергозатраты на укладку бетонных смесей, повысить производительность бетонирования железобетонных конструкций и ускорить темпы строительства.

К преимуществам самоуплотняющихся бетонов также относят:

- высокое качество поверхности изготавливаемых конструкций после их распалубки;
- улучшение сцепления бетона с арматурой и контактной зоны цементного камня с заполнителем;
- снижение проницаемости бетонов и повышение их долговечности.

Однако самоуплотняющиеся бетонные смеси отличаются от других видов бетонных смесей особыми требованиями к подбору состава бетона, повышенным расходом цемента и высокой стоимостью бетонных смесей [1–3].

Основные идеи исследования

Концепция самоуплотняющихся бетонов была впервые разработана в Японии в 1988 году учёными Токийского университета Н. Okamura, К. Ozawa, М. Ouchi. Согласно данной концепции, большое влияние на подвижность бетонной смеси оказывает расход крупного заполнителя, который повышает трение между её составляющими и увеличивает сопротивление текучести. В связи с этим для достижения самоуплотняемости бетонных смесей требуется уменьшение расхода крупного заполнителя с соответствующим увеличением количества песка и растворной части. Так, содержание крупного заполнителя в бетонной смеси должно составлять 50 % от объёма твердых частиц, а расход песка должен равняться 40 % от объёма раствора. При этом высокая удобоукладываемость бетонной смеси может быть достигнута только при использовании эффективных суперпластификаторов, обеспечивающих снижение отношения объёма воды к объёму тонкодисперсных компонентов до 0,9...1,0 [2–6].

На данный момент наибольшей эффективностью среди пластифицирующих добавок в цементных системах обладают суперпластификаторы на основе поликарбоксилатных эфиров, позволяющие снижать водопотребность бетонных смесей до 40 %.

Поликарбоксилатные суперпластификаторы нашли распространение в нашей стране относительно недавно. В отличие от суперпластификаторов на основе

нафталиновых и меламиновых сульфонов, поликарбоксилатные суперпластификаторы характеризуются пространственным строением молекул с разветвленными боковыми цепями, что способствует более эффективной диспергации цементных флокулов за счет стерического эффекта. Данные суперпластификаторы имеют значительную водоредуцирующую и пластифицирующую способность и обеспечивают получение высокоподвижных и самоуплотняющихся бетонных смесей с высокой сохраняемостью реологических свойств [7–9].

Однако применение суперпластификаторов не обеспечивает достаточной раздвижки зёрен заполнителей, при которой самоуплотняющаяся бетонная смесь будет стойкой к расслоению. Высокая вязкость и стойкость самоуплотняющихся бетонных смесей к расслоению чаще всего достигаются за счет увеличения расхода вяжущих материалов, что приводит к удорожанию бетонных смесей, а также к повышенной экзотермии и усадке бетонов. Для снижения расхода цемента в составе самоуплотняющихся бетонных смесей целесообразно применять тонкодисперсные минеральные наполнители. В качестве минеральных добавок обычно используются побочные продукты промышленности, такие как зола-унос, доменный гранулированный шлак, микрокремнезём, а также некоторые тонкоизмельченные горные породы, например известняковый порошок [10–12].

Одной из основных задач *подбора рациональных составов бетонных смесей* является определение соотношения компонентов, обеспечивающего минимальный расход цемента при достижении требуемых физико-механических и эксплуатационных характеристик бетонов.

Для получения высокоподвижных самоуплотняющихся бетонных смесей важно учитывать, чтобы объём цементного теста превышал объём пустот между зёр-

нами заполнителей для обеспечения необходимой раздвижки зёрен и снижения трения между ними. С целью минимизации расхода цементного теста и достижения наибольшей удобоукладываемости самоуплотняющейся бетонной смеси требуется, чтобы гранулометрический состав заполнителей обеспечивал их максимальную плотность упаковки как самых дешёвых компонентов бетонной смеси. В таком случае пустоты между зёрнами заполнителей будут заполняться портландцементом и тонкодисперсными добавками, а вода станет играть роль смазки между твердыми компонентами бетонной смеси. Самоуплотняющиеся бетонные смеси, разработанные по методу плотной упаковки заполнителей, отличаются высокой удобоукладываемостью и экономичностью [13–17].

Целью исследования являлось определение наиболее эффективного соотношения мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняющихся бетонных смесей, при котором достигаются минимальная пустотность заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов.

Материалы и методы исследования

Для приготовления самоуплотняющихся бетонных смесей в качестве вяжущего применялся портландцемент ЦЕМ I 52,5Н производства ООО «Аккерманн цемент» (г. Новотроицк). Клинкер данного цемента имел следующий минералогический состав: C_3S – 62,1 %; C_2S – 15,8 %; C_3A – 5,0 %; C_4AF – 13,2 %. В качестве пластифицирующей добавки использовался суперпластификатор на основе поликарбоксилатных эфиров Sika ViscoCrete 25 HE-C в виде водного раствора плотностью 1,08 г/см³. В качестве крупного заполнителя применялся щебень из плотных горных пород фракции 5-20 мм с маркой по дробимости 1400, истинной плотностью 3,0 г/см³, насыпной плотностью 1,56 г/см³,

пустотностью 48 %. В качестве мелкого заполнителя использовался природный кварцевый песок с модулем крупности 1,9, истинной плотностью 2,65 г/см³, насыпной плотностью 1,51 г/см³, пустотностью 43 %. Гранулометрический состав заполнителей показан в таблице 1.

Таблица 1. Гранулометрический состав заполнителей

Table 1. Granulometric composition of aggregate mixture

Показатель	Щебень	Песок
Частные остатки на ситах, %:		
20 мм	2,1	–
10 мм	58,7	–
5 мм	35,3	–
2,5 мм	3,8	1,2
1,25 мм	1,1	2,7
0,63 мм	–	20,4
0,315 мм	–	40,4
0,16 мм	–	32,1
< 0,16 мм	–	3,2

Составы самоуплотняющихся бетонных смесей подбирались из условия получения смесей с маркой по удобоукладываемости РК2 (расплыв стандартного конуса 66...75 см) с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021 [18]. Удобоукладываемость бетонных смесей определялась по распылу конуса в соответствии с ГОСТ Р 59715-2022. По времени распыла бетонных смесей до диаметра 500 мм характеризовалась вязкость самоуплотняющихся бетонных смесей. Расслаиваемость самоуплотняющихся бетонных смесей оценивалась по визуальным индексам стабильности смесей VSI в соответствии с приложением А ГОСТ Р 59715-2022.

Из бетонных смесей изготавливались образцы-кубы размером 100×100×100 мм. В возрасте 28 суток твердения в нормальных условиях образцы подвергались механическим испытаниям. Прочность образцов определялась в соответствии с ГОСТ 10180-2012, плотность – по ГОСТ 12730.1-2020, водопоглощение – по ГОСТ 12730.3-2020.

Результаты исследования

С целью минимизации расхода цемента в составе самоуплотняющихся бетонных смесей на первом этапе определялось наиболее рациональное соотношение мелкого и крупного заполнителей из условия достижения их минимальной пустотности. Соотношение песка и щебня в смеси заполнителей варьировалось в диапазоне от 30:70 до 60:40 массовых %.

Пустотность смеси заполнителей V_n определялась по формуле

$$V_n = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_{и}}\right) \cdot 100,$$

где ρ_n – насыпная плотность смеси заполнителей, г/см³;

$\rho_{и}$ – истинная плотность смеси заполнителей, г/см³.

Насыпная плотность смеси заполнителей определялась как отношение массы заполнителей к их объему в стандартном неуплотнённом состоянии. Истинная плотность смеси заполнителей определялась расчетным путем с учетом значений истинной плотности песка 2,65 г/см³ и щебня 3,0 г/см³ и их долей в смеси заполнителей.

Результаты определения пустотности смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня показаны в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Пустотность смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня

Table 2. Voidness in aggregate mixture depending on the content of sand and crushed rock

Доля песка	Доля щебня	Насыпная плотность, г/см ³	Истинная плотность, г/см ³	Пустотность, %
0,30	0,70	1,954	2,895	32,5
0,35	0,65	1,995	2,878	30,7
0,40	0,60	2,005	2,860	29,9
0,45	0,55	2,000	2,843	29,7
0,50	0,50	1,974	2,825	30,1
0,55	0,45	1,936	2808	31,0
0,60	0,40	1,897	2,790	32,0

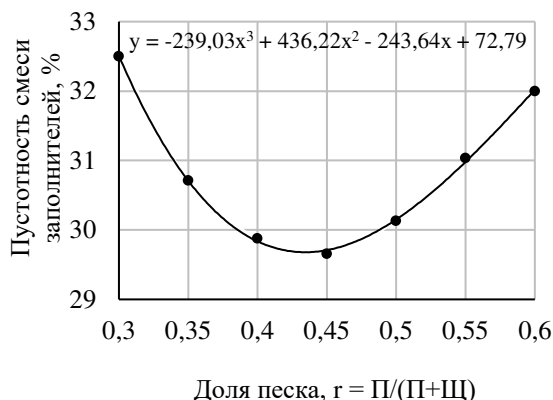


Рис. 1. Пустотность смеси заполнителей в зависимости от содержания песка и щебня

Fig. 1. Voidness in aggregate mixture depending on the content of sand and crushed rock

По результатам исследования установлено, что для применяемых заполнителей (песок с модулем крупности 1,9 и щебень фракции 5-20 мм) максимальная плотность упаковки и минимальная пустотность смеси заполнителей достигаются при массовой доле песка $r = П/(П+Щ) = 0,45$. При этом минимальный объем пустот смеси заполнителей составляет $V_{пуст} = 297 \text{ л/м}^3$. При изменении доли песка до значений $r = 0,40$ и $r = 0,50$ наблюдается увеличение пустотности заполнителей на 0,7 и 1,6 % соответственно. Повышение пустотности заполнителей будет приводить к перерасходу цементного теста в составе самоуплотняющихся бетонных смесей и увеличению их стоимости.

На следующем этапе исследовано влияние доли песка в наиболее рациональном диапазоне 0,4...0,5 на удобоукладываемость самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механические свойства бетонов.

Составы самоуплотняющихся бетонных смесей подбирались с учетом требований ГОСТ Р 59714-2021. Расход вяжущего составлял 550 кг/м^3 . Дозировка суперпластификатора была принята на

основании ранее проведенных исследований и составляла 1 % от массы вяжущего [19, 20]. Расход воды был принят 170 кг/м^3 из условия получения самоуплотняющихся бетонных смесей с маркой по удобоукладываемости РК2 (расплыв нормального конуса 66...75 см).

Общий объем цементного теста в составе бетонных смесей составлял 350 л/м^3 . Данного объема цементного теста достаточно для заполнения пустот между зёрнами заполнителей ($V_{пуст} = 297 \text{ л/м}^3$), а также для формирования необходимой прослойки цементного теста на их поверхности, повышающей способность бетонной смеси к самоуплотнению. Снижение объема цементного теста менее 350 л/м^3 приведет к уменьшению раздвижки зерен заполнителей и увеличению трения между ними. При этом подвижность системы будет недостаточной для получения самоуплотняющихся бетонных смесей.

Исследуемые составы самоуплотняющихся бетонных смесей приведены в таблице 3. Соотношение песка и щебня в бетонных смесях варьировалось в диапазоне от 40:60 до 50:50 массовых %.

Таблица 3. Составы бетонных смесей с различным соотношением песка и щебня

Table 3. Composition of concrete mixtures with different ratios of sand and crushed rock

Доля песка	Состав бетонной смеси, кг/м^3					В/Ц
	Ц	П	Щ	В	ПКЭ	
0,40	550	736	1104	170	5,5	0,31
0,45		828	1012			
0,50		920	920			

Результаты определения технологических свойств самоуплотняющихся бетонных смесей и физико-механических характеристик бетонов с различным соотношением заполнителей показаны в таблице 4 и на рисунке 2.

Таблица 4. Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов с различным соотношением заполнителей

Table 4. Properties of self-compacting concrete mixtures and concretes with different aggregate ratios

Доля песка	Свойства бетонных смесей			Свойства бетонов		
	Распływ конуса, мм	Вязкость t_{500} , с	Индекс стабильности VSI	Прочность, МПа	Плотность, кг/м ³	Капиллярная пористость, %
0,40	725	7,9	2	74,1	2515	9,6
0,45	730	8,1	1	74,9	2495	9,2
0,50	680	9,2	1	70,0	2463	9,1

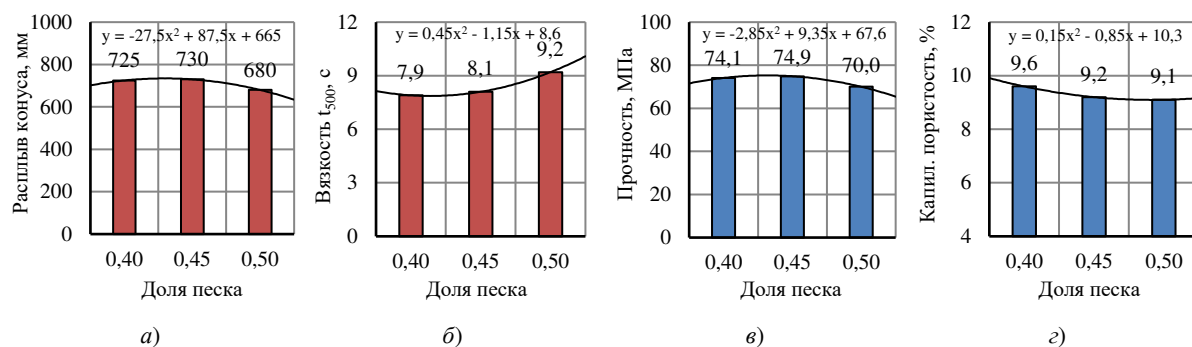


Рис. 2. Свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов с различным соотношением заполнителей: а – распływ бетонных смесей; б – вязкость бетонных смесей; в – прочность бетонов; г – капиллярная пористость бетонов

Fig. 2. Properties of self-compacting concrete mixtures and concretes with different aggregate ratios: a – spreading of concrete mixtures; б – viscosity of concrete mixtures; в – strength of concrete; г – capillary porosity of concrete

По результатам определения удобоукладываемости бетонных смесей установлено, что полученные смеси обладают высокой текучестью с распływом конуса 680...730 мм, соответствующей марке РК2 и не требующей виброуплотнения бетонных смесей. Наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей наблюдается при доле песка 0,45 (см. рис. 2а), что согласуется с результатами определения минимальной пустотности смеси заполнителей.

Уменьшение доли песка до значения 0,40, несмотря на снижение удельной поверхности и водопотребности заполнителей, не приводит к повышению подвижности бетонных смесей. Это связано с уменьшением объема растворной составляющей бетонной смеси, снижением раздвижки зёрен щебня и увеличением трения между ними. При этом уменьшение

количества песчаной фракции приводит к снижению стабильности бетонных смесей, появлению признаков их расслоения и водоотделения (VSI = 2, табл. 4).

При увеличении доли песка до значения 0,50 наблюдается повышение стабильности бетонных смесей, однако вместе с тем происходит резкое увеличение вязкости бетонных смесей на 14 % (см. рис. 2б) и снижение их удобоукладываемости на 7 %. Это связано с увеличением удельной поверхности заполнителей и снижением толщины прослойки цементного геля между ними.

По результатам определения физико-механических свойств самоуплотняющихся бетонов установлено, что наибольшая прочность бетонов в возрасте 28 суток также достигается при доле песка 0,45 (см. рис. 2в). Уменьшение доли песка до значения 0,40 приводит лишь к незначи-

тельному снижению прочности бетонов на 1 %. Также по результатам определения объёмного водопоглощения бетонов установлено, что снижение доли песка приводит к ухудшению структуры самоуплотняющихся бетонов и повышению их капиллярной пористости на 4 % (см. рис. 2г). Увеличение доли песка с 0,45 до 0,50 позволяет снизить капиллярную пористость бетонов на 1 %, в то же время вместе с этим наблюдается уменьшение прочности бетонов на 7 %.

На основе анализа полученных результатов можно сделать следующие **выводы**:

1. Установлены закономерности влияния доли песка в смеси заполнителей на свойства самоуплотняющихся бетонных смесей и бетонов.

2. Выявлено, что наиболее эффективным соотношением мелкого и крупного заполнителей в составе самоуплотняю-

щихся бетонных смесей (при использовании песка с модулем крупности 1,9 и щебня фракции 5-20 мм), при котором достигаются минимальная пустотность заполнителей, наилучшая удобоукладываемость бетонных смесей и наибольшая прочность бетонов, является соотношение $r = 0,45$.

3. Уменьшение количества песка приводит к появлению признаков расслоения и водоотделения самоуплотняющихся бетонных смесей, ухудшению структуры, снижению прочности бетонов и повышению их капиллярной пористости.

4. Увеличение доли песка позволяет повысить стабильность, увеличить вязкость самоуплотняющихся бетонных смесей при снижении их удобоукладываемости, что приводит к уменьшению капиллярной пористости бетонов, но снижает их прочность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самоуплотняющийся мелкозернистый бетон для ремонта стыков сборных железобетонных каркасов / С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов, А. О. Смирнов, А. А. Анисимова // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2022. № 4. С. 7-14.
2. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete // Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1, no. 1. P. 5-15.
3. Brouwers H. J. H., Radix H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study // Cement and Concrete Research. 2005. Vol. 35, no. 11. P. 2116-2136.
4. A review on mixture design methods for self-compacting concrete / C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 84. P. 387-398.
5. Калашников В. И. Расчет составов высокопрочных самоуплотняющихся бетонов // Строительные материалы. 2008. № 10. С. 4-6.
6. Несветаев Г. В., Лопатина Ю. Ю. Проектирование макроструктуры самоуплотняющейся бетонной смеси и её растворной составляющей // Наукоедение: интернет-журнал. 2015. Т. 7, № 5(30). С. 1-14.
7. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer / K. Yamada, T. Takahashi, S. Hanehara, M. Matsuhisa // Cement and Concrete Research. 2000. Vol. 30, no. 2. P. 197-207.
8. Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability / J. Plank, E. Sakai, C. W. Miao, C. Yu, J. X. Hong // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 78. P. 81-99.
9. Влияние поликарбоксилатных суперпластификаторов на структурообразование цементных паст / Л. М. Добшиц, О. В. Кононова, С. Н. Анисимов, А. Ю. Лешканов // Фундаментальные исследования. 2014. № 55. С. 945-948.
10. Juenger M. C. G., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 78. P. 71-80.
11. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design / C. Shi, Z. Wu, J. Xiao, D. Wang, Z. Huang, Z. Fang // Construction and Building Materials. 2015. Vol. 101. P. 741-751.
12. Самоуплотняющиеся бетоны нового поколения на основе местных сырьевых ресурсов /

О. В. Тараканов, В. И. Калашников, Е. А. Беякова, Р. Н. Москвин // Региональная архитектура и строительство. 2014. № 2. С. 47-53.

13. Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories / W. Zuo, J. Liu, Q. Tian, W. Xu, W. She, P. Feng, C. Miao // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 163. P. 938-948.

14. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete / W. J. Long, Y. Gu, J. Liao, F. Xing // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 167. P. 317-325.

15. Lin W. T. Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete // Construction and Building Materials. 2020. Vol. 242. P. 118046.

16. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand // IOP Conference Series: Materials Science and

Engineering. 2020. Vol. 869. P. 032039.

17. Богданов Р. Р., Ибрагимов Р. А., Королев Е. В. Оптимизация фракционного состава смеси заполнителей для самоуплотняющегося бетона // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. № 4(50). С. 327-335.

18. Новый национальный стандарт на самоуплотняющиеся бетонные смеси / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, И. А. Арзуманов, И. А. Чилин // Вестник НИЦ «Строительство». 2021. № 3(30). С. 30-40.

19. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Effect of superplasticizer and silica fume on the properties of self-compacting mortars // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 896. P. 012095.

20. Смирнов А. О. Самоуплотняющийся бетон с комплексной органоминеральной добавкой: дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2021. 180 с.

Статья поступила в редакцию 30.04.2024; одобрена после рецензирования 16.05.2024; принята к публикации 03.06.2024

Информация об авторах

СМИРНОВ Александр Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – разработка модифицированных самоуплотняющихся бетонов с пониженным расходом цемента. Автор более 40 научных публикаций. E-mail: SmirnovAO@volgatech.net

ДОБШИЦ Лев Михайлович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и технологий, Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва. Область научных интересов – долговечность железобетонных конструкций, морозостойкость бетонов, специальные добавки. Автор более 110 научных публикаций. E-mail: levdobshits@yandex.ru

АНИСИМОВ Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – разработка модифицированных бетонов для зимнего бетонирования. Автор более 70 научных публикаций. E-mail: AnisimovSN@volgatech.net

ЛЕШКАНОВ Андрей Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры строительных технологий и автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола. Область научных интересов – разработка бетонов с комплексными модификаторами; тепловлажностная обработка пластифицированных бетонов. Автор более 40 научных публикаций. E-mail: LeshkanovAI@volgatech.net

Вклад авторов: авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Scientific article

UDC 691.32

DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>

EDN: ARNNFZ

The impact of the amount of sand in the aggregate mixture on the properties of self-compacting concrete mixtures

A. O. Smirnov¹, L. M. Dobshits², S. N. Anisimov¹, A. Iu. Leshkanov¹

¹Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola),

²Russian University of Transport (MIIT) (Moscow)

SmirnovAO@volgatech.net[✉]

Abstract. *Introduction.* Self-compacting concrete has become increasingly popular in contemporary monolithic construction in recent years. By using self-compacting concrete, construction projects can be completed faster, with better surface quality and lower labour and energy costs involved in laying concrete mixtures. Self-compacting concrete mixtures, however, are more expensive, require more cement, and have unique design specifications for concrete mixes in comparison with other types of concrete mixtures. Finding the optimal component ratio that ensures the lowest amount of cement consumption while maintaining the necessary performance, mechanical, and physical properties of concrete is one of the primary tasks of developing rational compositions of concrete mixtures. In order to achieve the appropriate grain expansion and lower friction between the aggregate grains, it is crucial to consider that the amount of cement mixture exceeds the volume of voids between the grains in order to generate highly mobile self-compacting concrete mixtures.

The aim of the research was to determine the most effective ratio of fine and coarse aggregates in self-compacting concrete mixture composition in order to minimise aggregate intergranular porosity, optimise mixture workability, and maximise concrete strength.

Materials and methods. Natural quartz sand with a particle size modulus of 1.9 was used as fine aggregate. Crushed rock with a fraction of 5-20 mm was used as a coarse aggregate. The compositions of self-compacting concrete mixtures were selected from the condition of obtaining mixtures with workability grade RK2 (spread of a standard cone 66...75 cm) based on the requirements of GOST R 59714-2021.

Research results reveal that the lowest intergranular porosity of aggregates, the best workability of concrete mixtures, and the highest strength of concrete are all attained with a sand to aggregate ratio of $r = 0.45$. Reduced sand content deteriorates the structure, causes self-compacting concrete mixtures to segregate and bleed, reduces the strength of the concrete, and increases its capillary porosity.

Increasing the proportion of sand makes it possible to enhance stability and the viscosity of self-compacting concrete mixtures while reducing their workability, which leads to a decrease in the capillary porosity of concrete and as a result weakens the mixture strength.

Conclusion. It has been determined how the ratio of sand to aggregate affects the characteristics of self-compacting concrete mixtures and concretes. It was discovered that the ratio $r = 0.45$ represents the most efficient combination of fine and coarse particles in self-compacting concrete mixtures.

Keywords: self-compacting concrete; sand to aggregate ratio; intergranular aggregate porosity; workability; segregation; viscosity; compressive strength; water absorption.

Funding: this research received no external funding.

For citation: Smirnov A. O., Dobshits L. M., Anisimov S. N., Leshkanov A. Iu. The impact of the amount of sand in the aggregate mixture on the properties of self-compacting concrete mixtures. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies.* 2024;(1):7–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2024.1.7>; EDN: ARNNFZ

REFERENCES

1. Anisimov S. N., Leshkanov A. Ju., Smirnov A. O., Anisimova A. A. Self-compacting fine-grained concrete for repairing precast concrete frame joints. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2022;(4):7-14. (In Russ.).
2. Okamura H., Ouchi M. Self-Compacting Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2003;1(1):5-15.
3. Brouwers H. J. H., Radix H. J. Self-compacting concrete: Theoretical and experimental study. *Cement and Concrete Research*. 2005;35(11):2116-2136.
4. Shi C., Wu Z., Xiao J., Wang D., Huang Z., Fang Z. A review on mixture design methods for self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2015;84:387-398.
5. Kalashnikov V. I. Design of compositions of high-strength self-compacting concrete. *Stroitel'nye materialy*. 2008;(10):4-6. (In Russ.).
6. Nesvetaev G. V., Lopatina Ju. Ju. Design of macrostructure of self-compacting concrete and its mortar component. *Naukovedenie: Internet-zhurnal*. 2015;7(5):1-14. (In Russ.).
7. Yamada K., Takahashi T., Hanehara S., Matsuhisa M. Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. *Cement and Concrete Research*. 2000;30(2):197-207.
8. Plank J., Sakai E., Miao C. W., Yu C., Hong J. X. Chemical admixtures – Chemistry, applications and their impact on concrete microstructure and durability. *Cement and Concrete Research*. 2015;78:81–99.
9. Dobshic L. M., Kononova O. V., Anisimov S. N., Leshkanov A. Ju. The structure of the cement past polycarboxylate superplasticizers influence. *Fundamental research*. 2014;(55):945-948. (In Russ.).
10. Juenger M. C. G., Siddique R. Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete. *Cement and Concrete Research*. 2015;78:71-80.
11. Shi C., Wu Z., Xiao J., Wang D., Huang Z., Fang Z. A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. *Construction and Building Materials*. 2015;101:741-751.
12. Tarakanov O. V., Kalashnikov V. I., Beljakova E. A., Moskvina R. N. Self compacting concrete of new generation based on local raw materials. *Regional architecture and engineering*. 2014;(2):47-53. (In Russ.).
13. Zuo W., Liu J., Tian Q., Xu W., She W., Feng P., Miao C. Optimum design of low-binder Self-Compacting Concrete based on particle packing theories. *Construction and Building Materials*. 2018;163:938-948.
14. Long W. J., Gu Y., Liao J., Xing F. Sustainable design and ecological evaluation of low binder self-compacting concrete. *Journal of Cleaner Production*. 2017;167:317-325.
15. Lin W. T. Effects of sand/aggregate ratio on strength, durability, and microstructure of self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*. 2020;242:118046.
16. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Development of high-strength self-compacting concrete with low fineness modulus sand. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;869:032039.
17. Bogdanov R. R., Ibragimov R. A., Korolev E. V. Optimization of the fractional composition of the aggregate mixture for self-compacting concrete. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2019;(4):327-335. (In Russ.).
18. Kaprielov S. S., Shejnfel'd A. V., Arzumanov I. A., Chilin I. A. New national standard for self-compacting concrete mixes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;(3):30-40. (In Russ.).
19. Smirnov A., Dobshits L., Anisimov S. Effect of superplasticizer and silica fume on the properties of self-compacting mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;896:012095.
20. Smirnov A. O. Self-compacting concrete with complex organomineral additive: dis. ... kand. tehn. nauk. Moscow; 2021. 180 p. (In Russ.).

The manuscript was submitted on 30.04.2024; reviewed on 16.05.2024;
adopted for publication on 03.06.2024

Information about the authors

SMIRNOV Alexandr Olegovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – development of modified self-compacting concrete with reduced cement consumption. Author of more than 40 publications. E-mail: SmirnovAO@volgatech.net

DOBSHITS Lev Mikhailovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Department of Building Materials and Technologies, Russian University of Transport (MIIT), Moscow. Research interests – durability of reinforced concrete structures, frost resistance of concrete, special additives. Author of more than 110 publications. E-mail: levdobshits@yandex.ru

ANISIMOV Sergei Nikolaevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – development of modified concretes for winter concrete pouring. Author of more than 70 publications. E-mail: AnisimovSN@volgatech.net

LESHKANOV Andrei Iurevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technologies and Roads, Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola. Research interests – development of complex modified concretes; heat and moisture treatment of plasticized concrete. Author of more than 40 publications. E-mail: LeshkanovAI@volgatech.net

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this paper.

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest.

The authors reviewed the results and approved the final version of the manuscript.