

УДК 691

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗЕРНОВОГО СОСТАВА ЗАПОЛНИТЕЛЯ ДЛЯ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА

Л. И. Касторных, В. Д. Черепанов, В. Э. Березовой

Донской государственной технической университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Выполнен анализ зернового состава природных песков Донского региона. Установлено, что обогащение очень мелких песков крупными фракциями отсева камнедробления в оптимальном количестве приводит к уменьшению межзерновой пустотности и снижению водопотребности смеси. При этом обеспечивается её высокая текучесть и надежное сцепление с арматурой. Замена 30 % природного песка крупными фракциями отсева повышает прочность бетона при сжатии на 15 %, а прочность на растяжение при изгибе — в два раза.

Ключевые слова: мелкозернистый самоуплотняющийся бетон, отсева камнедробления, оптимизация зернового состава, заполнитель, кривые отсева, гранулометрический состав, рациональная гранулометрия, прочность при изгибе.

OPTIMIZATION OF GRAIN COMPOSITION OF AGGREGATE FOR FINE-GRAINED SELF-COMPACTING CONCRETE

L. I. Kastornykh, V. D. Cherepanov, V. E. Berezovoy

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The grain composition of natural sands of the Don region is analyzed. It is found that the enrichment of very fine sands with large fractions of rock crushing screening in an optimal amount leads to a decrease in the intergranular voidness and a decrease in the water demand of the mixture. This ensures its high fluidity and reliable coupling with the rebar. Replacing 30 % of natural sand with large fractions of sifting increases the compressive strength of concrete by 15 %, and the tensile strength of bending – by two times.

Keywords: fine-grained self-compacting concrete, rock-crushing screening, optimization of the grain composition, aggregate, screen curves, grain-size composition, rational grain-sizing, bending resistance

Введение. Зерновой состав заполнителя является главным фактором, отражающим техническую и экономическую эффективность бетона. Гранулометрия мелкого заполнителя определяет водопотребность, расход вяжущего в бетонной смеси и, следовательно, формирует её стоимость. Другие технологические факторы, такие как вид и расход материалов, удобоукладываемость смеси, носят постоянный характер, зависят от условий формирования и нормируемых требований по прочности [1].

Оптимизации зернового состава заполнителей посвящены исследования [2–6]. Для практического применения рекомендованы различные оценки их гранулометрического состава, например, модуль крупности и зерновая характеристика, кривые отсева, позволяющие находить смеси заполнителей с минимальной межзерновой пустотностью. В зарубежной инженерной практике используются кривые Фуллера как эталоны для достижения наиболее плотной упаковки заполнителя [4]. В российских нормативных документах представлены кривые отсева заполнителей, характеризующие область рациональной гранулометрии и гарантирующие получение бетона требуемой прочности. Следует отметить, что кривые Фуллера моделируют упаковку частиц правильной сферической формы, что в реальных производственных условиях недостижимо. А кривые отсева заполнителей в отечественной строительной практике адаптированы для обычных виброуплотняемых бетонных смесей средней подвижности. Поэтому для высокоподвижных и самоуплотняющихся смесей с эффективными модификаторами поиск оптимального зернового состава заполни-

телей необходимо выполнять опытным путем по минимальной межзерновой пустотности с учетом технологических особенностей формования [6].

Самоуплотняющиеся бетонные смеси, широко применяемые в монолитном строительстве для бетонирования густоармированных конструкций, имеют ограничения по крупности зерен заполнителя до 10–15 мм. В таких условиях рационально использование мелкозернистых самоуплотняющихся смесей [7, 8], для которых важную роль играет не только размер зерен, но и их форма. Для обеспечения высокой текучести смеси целесообразно применять заполнители округлой сферической формы и подбирать химические модификаторы, обеспечивающие связность и нераслаиваемость структурированной системы [9].

В настоящее время получение высокопрочного мелкозернистого бетона вполне достижимо [2, 10]. При производстве железобетонных изделий по безвибрационной технологии из самоуплотняющихся мелкозернистых смесей высокая прочность бетона может быть достигнута при обогащении природного песка прочными крупными фракциями отсева дробления горных пород на щебень. Основной задачей при этом является оптимизация расхода отсева камнедробления, так как его частицы, характеризующиеся развитой шероховатой поверхностью, оказывают значительное влияние на водопотребность и растекаемость бетонной смеси [7, 8].

Для обеспечения самоуплотняемости бетонных смесей решающую роль играют химические добавки — гиперпластификаторы. В реальных условиях производства выбор добавок должен согласовываться с видами вяжущего и других минеральных компонентов смеси. Для достижения высокой эффективности применения бетона требуется экспериментальное подтверждение совместимости цемента и гиперпластификатора по реологической активности добавки [11–13]. Применение инновационных модифицирующих добавок должно быть обосновано по техническим и экономическим показателям [14].

Цель настоящей работы — на основании экспериментальных исследований определить рациональный зерновой состав заполнителя и установить его влияние на основные свойства самоуплотняющегося мелкозернистого бетона.

Материалы и методы исследований. В настоящей работе для приготовления мелкозернистых бетонных смесей использованы следующие материалы:

1. Портландцемент бездобавочный класса СЕМІ 52,5N производства ADOGIM. Свойства цемента:

- прочность на сжатие в возрасте 28 суток — 59,7 МПа;
- истинная плотность — 3,19 г/см³;
- насыпная плотность — 1010 кг/м³;
- нормальная густота цементного теста — 29,0 %;
- удельная поверхность — 4054 см²/г.

2. Добавка MasterPolyHeed 3545 на основе эфиров полиарила и поликарбоксилата, поставляемая концерном BASF Societas Euroraеа и относящаяся к группе суперпластифицирующих и высоководоредуцирующих по ГОСТ 24211.

3. Заполнители:

- песок природный речной АО «Донтрансгидромеханизация» (ДонТГМ);
- песок природный кварцевый карьера «Цыганский»;
- отсев дробления песчаника на щебень ООО «Донской камень».

Основные характеристики мелких заполнителей представлены в табл. 1.

Основные характеристики мелких заполнителей

Показатель	Песок ДонТГМ	Песок карьера «Цыганский»	Отсев дробления песчаника
Нормативный документ	ГОСТ 8736	ГОСТ 8736	ГОСТ 31424
Истинная плотность, г/см ³	2,65	2,65	2,66
Насыпная плотность, кг/м ³	1415	1355	1400
Модуль крупности	1,22	1,48	2,66
Группа песка	Очень мелкий	Очень мелкий	Крупный
Наибольшая крупность, мм	-	-	5
Пустотность, %	46,6	48,9	47,4
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	1,0	1,1	0,8
Удельная поверхность пылевидной составляющей отсева, см ² /г	-	-	4000
Марка по дробимости при сжатии в цилиндре	-	-	1000

Для устранения негативного влияния пылевидных и глинистых частиц, в т. ч. глины в комках, в исследованиях применялись промытые пески. Крупные фракции отсева дробления горных пород на щебень использовались для обогащения очень мелкого природного песка [7].

Средняя плотность мелкозернистых самоуплотняющихся смесей определялась по методике ГОСТ 10181. Изготовление, хранение и испытание образцов-кубов мелкозернистого бетона с номинальным размером ребра 100 мм выполнено по методике ГОСТ 10180.

Удобоукладываемость мелкозернистых самоуплотняющихся смесей установлена по растекаемости бетонного конуса по методике ГОСТ Р 58002-2017/EN 12350-8:2010. Диаметр расплыва бетонной смеси SF определен измерением диаметра расплывшейся лепешки d_1 и d_2 рулеткой в двух взаимно перпендикулярных направлениях:

$$SF = \frac{d_1 + d_2}{2}.$$

Для моделирования процесса укладки и уплотнения самоуплотняющихся смесей важное значение имеют реологические свойства, характеризующие способность смеси заполнять опалубочное пространство и обеспечивать надежное сцепление с арматурными элементами. Поэтому при определении растекаемости смеси одновременно установлены:

— реологическая характеристика — условная вязкость бетонной смеси T_{500} как время достижения смесью расплыва диаметра 500 мм;

— способность смеси к преодолению препятствий с помощью блокировочного кольца, имитирующего арматурные стержни (рис. 1).



Рис. 1. Прибор для определения растекаемости и реологических характеристик самоуплотняющихся бетонных смесей

Анализ и оптимизация зернового состава заполнителя для мелкозернистого самоуплотняющегося бетона. В ходе исследований проанализирован зерновой состав мелких заполнителей, установлена оптимальная дозировка отсева камнедробления для обогащения очень мелких природных песков. Зерновой состав песков и отсева камнедробления представлен в табл. 2, а кривые просеивания — на рис. 2.

Таблица 2

Результаты анализа зернового состава мелких заполнителей

Наименование заполнителя	Проба	Наименование остатка	Остаток, % по массе, на сите N					Проход через сито N 016, % по массе	Модуль крупности, M_k
			2,5	1,25	0,63	0,315	0,16		
Песок речной ДонТГМ (П1)	1	Частный	0,22	0,65	1,34	28,93	56,75	12,11	1,22
		Полный	0,22	0,87	2,21	31,14	87,89	100,0	
	2	Частный	0,24	0,69	1,29	28,83	57,03	11,92	1,22
		Полный	0,24	0,93	2,22	31,05	88,08	100,0	
Песок карьера Цыганский (П2)	1	Частный	0,29	0,83	1,88	44,86	47,58	4,56	1,48
		Полный	0,29	1,12	3,00	47,86	95,44	100,0	
	2	Частный	0,31	0,82	1,92	44,85	47,56	4,54	1,48
		Полный	0,31	1,13	3,05	47,90	95,46	100,0	
Отсев дробления песчаника (О)	1	Частный	23,6	14,1	14,7	14,0	16,2	17,4	2,63
		Полный	23,6	37,7	52,4	66,4	82,6	100,0	
	2	Частный	24,7	13,9	14,4	13,8	19,3	13,9	2,69
		Полный	24,7	38,6	53,0	66,8	86,1	100,0	
	3	Частный	24,1	14,4	14,2	13,5	18,5	15,3	2,66
		Полный	24,1	38,5	52,7	66,2	84,7	100,0	
Песок обогащенный (ПО)	П+О*	Частный	9,3	7,8	5,9	34,8	37,7	4,2	2,03
	80+20	Полный	9,3	17,1	23,0	57,8	95,8	100,0	
	П+О*	Частный	12,5	10,9	9,9	29,9	32,3	4,1	2,28
	70+30	Полный	12,5	23,4	33,3	63,2	95,9	100,0	

Примечание — * Отсев камнедробления смеси фракций 0,63–1,25; 1,25–2,5; 2,5–5,0 мм.

Анализ заполнителей показывает, что исследованные природные пески Ростовской области характеризуются стабильностью состава и относятся к группе очень мелких. Использование таких песков в бетонных смесях повышает водопотребность и расход цемента, поэтому их применение возможно только после обосновывающих испытаний в бетоне.

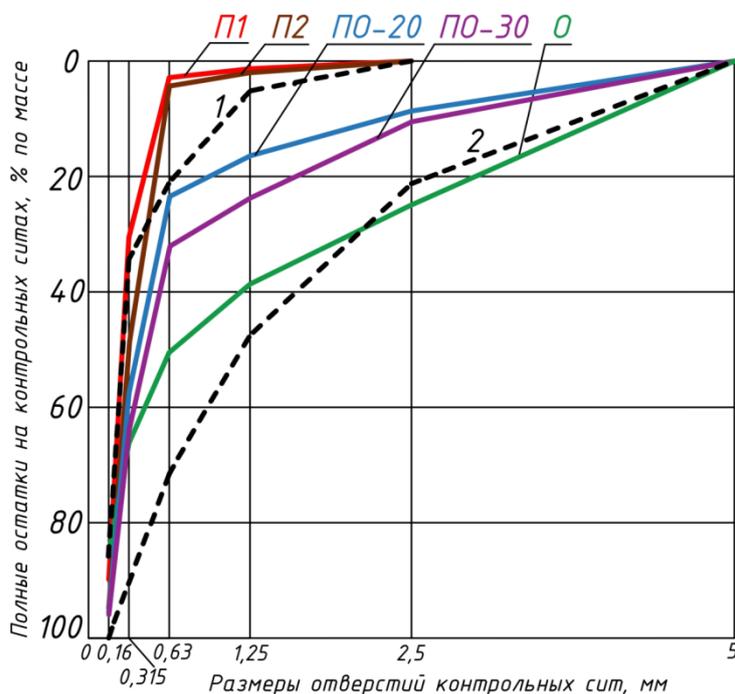


Рис. 2. Кривые просеивания мелких заполнителей: П1, П2, О, ПО-20, ПО-30 — обозначения заполнителей, соответствующие табл. 2; 1 и 2 — рекомендуемые нижняя ($M_k = 1,5$) и верхняя ($M_k = 3,25$) границы крупности песков соответственно

Отсев дробления песчаника не отличается стабильностью состава, особенно содержанием пылевидной фракции (разница между смежными пробами — 12 %). Наличие большого количества тонкодисперсных частиц, удельная поверхность которых составляет $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ и практически одинакова с удельной поверхностью цемента, что значительно повышает расход воды для обеспечения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси. Устранение этого негативного фактора потребует увеличения расхода цемента и дозировки суперпластификатора, что экономически нецелесообразно.

Эффективность применения пылевидной фракции в количестве 10–20 % установлена для отсевов камнедробления гранита в качестве минерального наполнителя в составе вяжущего для самоуплотняющихся бетонов [15]. В случае мелкозернистых смесей с использованием очень мелких песков применение отсевов дробления с повышенным содержанием пылевидной фракции неэффективно. Поэтому в настоящих исследованиях для получения мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и бетонов на их основе со стабильными показателями качества для обогащения песков использовались только крупные фракции отсева: 0,63–1,25; 1,25–2,5; 2,5–5,0 мм. Отсев вводился в количестве 20 и 30 % взамен части природного песка, чтобы зерновой состав заполнителя удовлетворял рекомендуемым характеристикам (рис. 2). Для оценки влияния зернового состава заполнителя на основные свойства мелкозернистых самоуплотняющихся смесей и бетонов на их основе приготовлены смеси марки по растекаемости SF-1, что соответствует диаметру расплава 55–65 см, с номинальным расходом цемента $510 \text{ кг}/\text{м}^3$ и добавкой MasterPolyHeed 3545 в количестве 1,6 % массы цемента. Технологические свойства и показатели конструктивности мелкозернистых самоуплотняющихся смесей приведены в табл. 3, а физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов — в табл. 4.

Таблица 3

Характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся смесей

Состав	Заполнитель	Доля отсева в заполнителе, %	Расход материалов на 1 м ³ смеси, кг					Диаметр распыла, см	Условная вязкость, T_{500} , с	В/Ц	Плотность смеси, кг/м ³
			Цемент	Вода	Песок	Отсев	Добавка				
1М	П1	–	380	342	1426	–	6,1	55,0	2	0,90	2155
2М	П2	–	501	282	1404	–	8,0	55,0	8	0,563	2195
3М	П1	20	515	288	1171	293	8,4	53,0	-	0,559	2275
4М	П2	20	510	268	1159	290	8,3	55,0	6	0,525	2235
5М	П2	30	519	265	1015	438	8,3	69,0	12	0,510	2245

Примечание: В/Ц — водоцементное отношение.

Таблица 4

Основные свойства мелкозернистых бетонов

Состав	Доля отсева в заполнителе, %	Ц/В	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа, в возрасте, сут.		
					1	7	28
1М	–	1,11	2125	-	-	6,4	21,2
2М	–	1,78	2180	1,38	8,6	18,2	39,1
3М	20	1,79	2176	2,81	10,1	19,4	40,2
4М	20	1,90	2220	2,76	10,8	20,0	41,7
5М	30	1,96	2244	2,79	13,4	21,8	44,8

Примечание: Ц/В — цементноводное отношение.

При проведении исследований установлено, что получение самоуплотняющихся мелкозернистых смесей на природном очень мелком песке с расходом цемента менее 400 кг/м³, что соответствует составу 1М (см. табл. 3), неэффективно, так как высокая водопотребность не обеспечивает стабильности свойств смеси и неизбежно приводит к снижению прочности бетона. Определён характер растекаемости мелкозернистых смесей с блокировочным кольцом, имитирующим арматурные стержни железобетонных конструкций (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Характер растекаемости мелкозернистых смесей с блокировочным кольцом:
а и б — растекаемость смесей составов 3М и 5М (см. табл. 3) соответственно

Если бетонная смесь не обладает свойствами самоуплотнения, как состав 3М с диаметром распыла 53 см, то без дополнительного вибрационного воздействия не будет обеспечена её растекаемость и сцепление с арматурой. Наоборот, бетонная смесь, способная к самоуплотнению, как состав 5М с диаметром распыла 69 см, свободно преодолевает препятствия и обеспечивает надежное сцепление с арматурой.

Замена 20 % природного песка П2 крупными фракциями отсева в соответствии с составом 4М (см. табл. 3) обеспечивает снижение водопотребности смеси на 5 %, увеличивая прочность бетона при сжатии на 6 %, а прочность на растяжение при изгибе — в два раза. При замене 30 % природного песка П2 крупными фракциями отсева в оптимальном соотношении по составу 5М водопотребность смеси снижается на 6 %, при этом растекаемость увеличивается до 69 см. Увеличение доли прочных зерен отсева в структуре бетона повышает его плотность и прочность при сжатии на 15 %. Дальнейшее увеличение доли отсева с развитой остроугольной поверхностью частиц приводит к структурированию системы и снижению растекаемости смеси [7].

Значительное влияние на формирование основных свойств мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов оказывает добавка нового поколения — гиперпластификатор MasterPolyNeed 3545. Обладая одновременно высокими водоредуцирующим и водоудерживающим эффектами, она снижает риск водоотделения и расслоения в процессе транспортирования и укладки смесей, гарантируя достижение бетоном требуемых показателей качества.

Динамика развития прочностных свойств мелкозернистых бетонов свидетельствует о том, что для формирования мелкопористой малодефектной структуры с целью ускорения твердения железобетонных изделий в заводских условиях, потребуется использование «мягких» режимов тепловой обработки [16].

Заключение. Анализ зернового состава природных песков Донского региона показал, что они относятся к группе очень мелких и их использование возможно только совместно с высоководоредуцирующими добавками после обосновывающих испытаний в составе бетона. Установлено, что обогащение очень мелких природных песков крупными фракциями отсева камнедробления в оптимальном количестве приводит к уменьшению межзерновой пустотности и снижению водопотребности смеси, обеспечивая при этом её высокую текучесть и надежное сцепление с арматурными элементами. Замена 30 % природного песка крупными фракциями отсева увеличивает долю прочных зерен в структуре мелкозернистого бетона и повышает его прочность при сжатии на 15 %, а прочность на растяжение при изгибе — в два раза.

Библиографический список

1. Подуровский, Н. И. Оптимизация зернового состава заполнителя бетона напорного формования / Н. И. Подуровский, Л. И. Касторных // Прочность и долговечность строительных материалов : сб. науч. тр. аспирантов. — Ростов-на-Дону : Изд-во Ростовской-на-Дону гос. акад. стр-ва, 1994. — С. 10–17.
2. Морозов, Н. М. Оптимизация гранулометрического состава песка для получения высокопрочного тонкозернистого бетона / Н. М. Морозов, И. В. Боровских, В. Г. Хозин // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2008. — № 2. — С. 121–125.
3. Белов, В. В. Оптимизация структуры мелкозернистого карбонатного бетона с применением компьютерного моделирования / В. В. Белов, И. В. Образцов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. — 2013. — Вып. 31(50). — С. 555–562.

4. Федорович, П. Л. Физико-технические свойства конструкционного бетона во взаимосвязи с гранулометрией мелкого заполнителя / П. Л. Федорович, Э. И. Батяновский // Современные проблемы внедрения европейских стандартов в области строительства : матер. междунар. науч.-метод. конф. — Минск : Изд-во Белорус. нац. техн. ун-та, 2014. — С. 186–196.

5. Батяновский, Э. И. Обеспечение качества бетона при использовании цемента с гранитным отсевом и обогащении песка его крупными фракциями / Э. И. Батяновский, А. В. Смоляков, П. Л. Федорович // Технологии бетонов. — 2014. — № 6. — С. 37–39.

6. Особенности состава бетонных смесей для бетононасосной технологии / Л. И. Касторных, А. В. Каклюгин, М. А. Гикало, И. В. Трищенко // Строительные материалы. — 2020. — № 3. — С. 4–11. — DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-779-3-4-11>.

7. Касторных, Л. И. Влияние отсева камнедробления и минерального наполнителя на характеристики мелкозернистых самоуплотняющихся бетонов / Л. И. Касторных, А. Г. Тароян, Л. М. Усепян // Инженерный вестник Дона : [сайт]. — 2017. — № 3. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4340/ (дата обращения: 10.08.2020).

8. Усепян, Л. М. Особенности производства железобетонных изделий из высокоподвижных смесей с отсевами камнедробления / Л. М. Усепян, А. Г. Тароян, Л. И. Касторных // Молодой исследователь Дона. — 2017. — № 4(7). — С. 90–94. — URL: mid-journal.ru/upload/iblock/de6/16-useryan-90_94.pdf (дата обращения: 10.08.2020).

9. Рауткин, А. В. Выбор химических модификаторов для обеспечения растекаемости самоуплотняющихся бетонных смесей / А. В. Рауткин, Л. И. Касторных // Молодой исследователь Дона. — 2017. — № 4(7). — С. 118–126. — URL: mid-journal.ru/upload/iblock/5a8/20-rautkin-118_126.pdf (дата обращения: 10.08.2020).

10. Мелкозернистый бетон высокой прочности / С. В. Федосов, М. В. Акулова, А. М. Краснов [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. — 2010. — № 2(14). — С. 286–291.

11. Касторных, Л. И. Об эффективности использования модификатора вязкости в самоуплотняющихся бетонах / Л. И. Касторных, В. П. Скиба, А. Е. Елсуфьев // Инженерный вестник Дона. — 2017. — № 3. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n3y2017/4346/ (дата обращения: 10.08.2020).

12. Касторных, Л. И. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть I. Реологические характеристики цементных композиций / Л. И. Касторных, А. В. Рауткин, А. С. Раев // Строительные материалы. — 2017. — № 7. — С. 34–38.

13. Касторных, Л. И. Влияние водоудерживающих добавок на некоторые свойства самоуплотняющихся бетонов. Часть 2. Реологические характеристики бетонных смесей и прочность самоуплотняющихся бетонов / Л. И. Касторных, И. А. Деточенко, Е. С. Арина // Строительные материалы. — 2017. — № 11. — С. 22–27.

14. Трищенко, И. В. Об оценке эффективности инвестиций на стадии внедрения результатов научно-исследовательских работ / И. В. Трищенко, А. В. Каклюгин, Л. И. Касторных // Инженерный вестник Дона. — 2019. — № 2. — URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2019/5745/ (дата обращения: 10.08.2020).

15. Беднев, Д. С. Применение пылевидной фракции отсевов камнедробления для самоуплотняющихся бетонов / Д. С. Беднев, А. С. Добродеева, А. И. Макеев // Студент и наука. — 2020. — № 1(12). — С. 99–105.

16. Kastornykh, L. I. Heat Curing Efficiency Estimation of Concrete with Superplasticators on Polycarboxylates Basis / L. I. Kastornykh, I. V. Trischenko, A. V. Kakljugin, D. R. Shershen // Materials Science Forum, Vol. 974, Materials and Technologies in Construction and Architecture II, pp. 231-236, 2019. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.974.231>.

Об авторах:

Касторных Любовь Ивановна, доцент кафедры «Технологический инжиниринг и экспертиза в стройиндустрии» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, доцент, likas9@mail.ru

Черепанов Вадим Дмитриевич, студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vadim.rgsu@yandex.ru

Березовой Владислав Элвисович, магистрант Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), vlad.berezovoy@gmail.com

Authors:

Kastornykh, Lyubov I., Associate professor, Department of Technological Engineering and Expertise in the Construction Industry, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Cand.Sci., Associate professor, likas9@mail.ru

Cherepanov, Vadim D., Student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), vadim.rgsu@yandex.ru

Berezovoy, Vladislav E., Master's degree student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), vlad.berezovoy@gmail.com