

УДК 666.9.017

**М. Э. ВОРОНЕНКО, А. А. СКИБИНА, Е. В. ЕГОРОВА, С. В. ЛАХТАРИНА, И. Ю. ПЕТРИК**  
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»**ТЯЖЕЛЫЙ БЕТОН ДЛЯ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

**Аннотация.** В статье дано теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности применения пуццолановых цементов и химических добавок в составе тяжелых бетонов. Для получения наиболее плотного и долговечного бетона выполнен подбор массового соотношения крупного и мелкого заполнителей. В результате экспериментальных исследований установлено, что при использовании крупного заполнителя фракций 5...10 / 10...20 мм оптимальное их количество и соотношение составляет 30/70 и 70/30 %. Заполнить остаточное межзерновое пространство целесообразно мелким заполнителем при его содержании 43 % от общей массы всех заполнителей. В частности использование в составе бетонных смесей золы-уноса Зуевской ТЭС в количестве 30 % взамен цемента в составе комбинированного вяжущего и суперпластификатора Р7 торговой марки «ГринТермо» позволяет получить бетоны с улучшенными характеристиками, при использовании мелкого заполнителя, не отвечающего требованиям нормативных документов.

**Ключевые слова:** гидротехнический бетон, состав бетона, зола-уноса, суперпластификатор, пустотность, подвижность, прочность.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ**

Гидротехнический бетон используется в конструкциях, которые подвергаются переменному или постоянному воздействию воды. Следовательно, данный бетон должен иметь повышенные показатели плотности и прочности, водонепроницаемости и морозостойкости. Основное отличие гидротехнического бетона от обычного тяжелого в том, что он имеет определенный компонентный состав, который обеспечивает повышенную долговечность и работоспособность конструкции, прежде всего эксплуатируемых в зоне переменного уровня вод и в подводной части сооружений.

В настоящее время существуют несколько способов повышения плотности и гидроизоляционных свойств бетона [1]:

1. Подбор оптимального фракционного состава заполнителя, а именно соотношение фракций заполнителей должно обеспечить минимальную межзерновую пустотность.

2. Выбор и обоснование вида цемента. В гидротехническом бетоне разрешается применение обычного портландцемента, пластифицированного, гидрофобного, сульфатостойкого и пуццоланового цементов. Кроме того, целесообразно использовать в составе бетонной смеси, для замены части цемента, уменьшения тепловыделения при твердении и повышения прочностных показателей, в качестве микрозаполнителей активные минеральные добавки (микрокремнезем, зола-уноса).

3. Уменьшение количества воды в бетонной смеси и использование пластифицирующих добавок, что повлечет за собой изменение удобоукладываемости.

4. Уплотнение бетонной смеси. При формировании конструкций необходимо следить за режимом уплотнения бетонной смеси и добиваться получения как можно более плотной структуры бетона.

5. Применение ускоренных способов набора бетоном прочности. Допускается как использование искусственного прогрева бетонной смеси, так и применение химических добавок – ускорителей твердения.

6. Повышение плотности методом инъектирования. В поры, трещины и другие дефекты структуры бетона нагнетаются торкрет-растворы, которые в бетоне набирают прочность и создают барьер для фильтрации воды и уплотняют структуру бетона. Инъекция бетона осуществляется несколькими способами: цементация (нагнетание цементного молока), силикатизация (нагнетание жидкого стекла) и смолизация (нагнетание синтетических смол).

© М. Э. Вороненко, А. А. Скибина, Е. В. Егорова, С. В. Лахтарина, И. Ю. Петрик, 2022

На долговечность гидротехнических бетонов основное влияние оказывает нецелесообразное использование минеральных и химических добавок, нарушение технологии производства, транспортирования и укладки бетонной смеси. Основной проблемой гидротехнического бетона является его разрушение под действием впитываемой влаги.

Главный критерий оценки качества гидротехнических бетонов – стойкость к агрессивной внешней среде. Также следует обеспечить минимальный показатель тепловыделения в процессе гидратации портландцемента. Это можно решить с применением золы-уноса ТЭС в качестве компонента вяжущих веществ в составе бетонов. Однако применение пуццолановых добавок вызывает ряд проблем, оказывающих влияние на свойства бетона. Тип золы, ее различная активность, минералогический и гранулометрический составы – все эти характеристики влияют на свойства затвердевшего бетона.

При массивном строительстве необходимо добиться высокой подвижности бетонной смеси для быстрого возведения конструкции [2]. Для бетона в зоне переменного уровня воды применяют щебень или гравий со средней плотностью зерен не ниже 2 500 кг/м<sup>3</sup> и водопоглощением не более 0,5 % для заполнителей из изверженных и метаморфических пород и 1 % для осадочных пород. Для бетона внутренней, подводной и надводной зон плотность зерен крупного заполнителя должна быть не ниже 2 300 кг/м<sup>3</sup>, а водопоглощение – не более 0,8 % для заполнителя из изверженных и метаморфических пород и 2 % – для осадочных пород [3]. Для бетонов гидротехнических сооружений допускается использовать песок с модулем крупности от 1,5 до 3,5. При этом мелкий песок с крупным модулем равным или меньшим 2,0, используется при обязательном применении пластифицирующих поверхностно-активных добавок [4].

**Целью исследования** является теоретическое и экспериментальное обоснование целесообразности применения пуццолановых и химических добавок; подбор оптимального соотношения фракций щебня для получения наиболее плотного и долговечного гидротехнического бетона.

## ОСНОВНОЙ МАТЕРИАЛ

Для определения целесообразности исследования применения минеральной добавки на свойства бетонных смесей и бетонов были приготовлены составы с использованием золы ТЭС в качестве замены части цемента.

Добавка-суперпластификатор Р7 предназначена для получения растворных и бетонных смесей повышенной подвижности и растекания. Кроме этого, она способствует ускорению процесса перемешивания и транспортирования смесей насосами к месту укладки, а также повышает морозостойкость бетона в конструкции.

В качестве компонентов для приготовления бетонных смесей приняты:

- портландцемент (ПЦ) ПЦ I-500 ООО «Донцемент» ( $S_{уд.} = 357 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;  $НГ = 26,2 \%$ ,  $R_{28} = 51,5 \text{ МПа}$ );
- песок кварцевый (П) Ясиноватского карьера с  $M_k = 1,3$  (содержание ПИГ = 3 %, насыпная плотность = 1 207 кг/м<sup>3</sup>);
- щебень (Щ) гранитный Тельмановского месторождения (фракции 5...10 мм, 10...20 мм; марка по дробимости Др1000);
- минеральная добавка: зола-уноса (ЗУ) Зуевской ТЭС (удельная поверхность по Блэйнму 290 м<sup>2</sup>/кг; потери при прокаливании 6,92 %);
- суперпластификатор (СП) Р7 торговой марки «ГринТермо, г. Торез (плотность дисперсии 1,14 г/см<sup>3</sup>, рН = 10...11).

Химико-минералогический и фракционный составы даны в таблицах 1 и 2 соответственно.

**Таблица 1** – Химико-минералогический состав золы-уноса Зуевской ТЭС

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>	BaO	MnO	ZrO <sub>2</sub>	SrO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	NiO	Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	ZnO	CuO
57,19	25,05	8,94	3,09	1,79	1,45	1,05	0,67	0,27	0,18	0,08	0,07	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01

Для получения наиболее плотной структуры бетона были выполнены испытания по подбору оптимального соотношения фракций мелкого и крупного заполнителей. Первый этап подбора заключался в установлении, при каком соотношении фракций 5...10 мм и 10...20 мм достигается наименьшая пустотность крупного заполнителя. Результаты по определению насыпной плотности и межзерновой пустотности крупного заполнителя приведены в таблице 3.

Таблица 2 – Фракционный состав золы-уноса Зуевской ТЭС

Размер частиц, мкм		Массовая доля фракций золы, %
минимальный	максимальный	
0,3	0,5	1,56
0,5	1	1,64
1	2	2,66
2	3	1,68
3	4	1,61
4	5	1,68
5	10	8,31
10	20	17,82
20	30	18,01
30	40	14,21
40	50	9,74
50	60	6,36
60	70	4,28
70	80	2,93
80	90	2,01
90	100	1,48
100	120	1,87
120	150	1,53
150	200	1,12
200	299	0,48

Таблица 3 – Результаты определения насыпной плотности и межзерновой пустотности крупного заполнителя

№ состава	Масса крупного заполнителя, г		Насыпная плотность, $\rho_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	Пустотность, $\Pi_0$ , %
	фракция 5...10 мм	фракция 10...20 мм		
1	3 000	0	1 335	49,85
2	0	3 000	1 293	51,43
3	300	2 700	1 343	49,55
4	600	2 400	1 378	48,23
5	900	2 100	1 401	47,37
6	1 200	1 800	1 359	48,95
7	1 500	1 500	1 379	48,20
8	1 800	1 200	1 360	48,91
9	2 100	900	1 386	47,93
10	2 400	600	1 380	48,16
11	2 700	300	1 362	48,83

Из полученных данных следует, что наименьшими значениями пустотности характеризуются составы № 5 и 9, с соответственно сочетанием фракций крупного заполнителя 5...10/10...20 мм при их соотношении 30/70 и 70/30 %.

На втором этапе подбора определим, на каком процентном соотношении мелкого заполнителя в общей массе крупного заполнителя смесь будет иметь наибольшее значение насыпной плотности. Результаты испытаний приведены в таблице 4.

Из таблицы следует, что наибольшее значение насыпной плотности – 1 782 кг/м<sup>3</sup> достигается при содержании мелкого заполнителя в смеси с крупным в количестве 43 %. В дальнейшем происходит вытеснение крупного заполнителя мелким, что снижает значения насыпной плотности.

Исходя из полученных результатов разработаны проектные составы тяжелых бетонов с использованием соотношения фракций щебня 5...10 / 10...20 мм в количестве 70/30 % (1, 3 составы) и 30/70 % (2, 4 составы). Количество мелкого заполнителя от общей массы всех заполнителей – 43 %. Кроме основных компонентов, в состав бетонной смеси были введены суперпластификатор в количестве 0,8 и 1,0 % от массы вяжущего и зола-уноса в количестве 10 и 30 % взамен части портландцемента в составе вяжущего. Составы бетонных смесей (на 1 м<sup>3</sup>) приведены в таблице 5.

**Таблица 4** – Результаты определения насыпной плотности смеси заполнителей

№ состава	Масса заполнителя, г		Насыпная плотность, $\rho_{нас}, \text{кг/м}^3$
	крупный (Щ)	мелкий (П)	
1	3 000	600	1 530
2	3 000	700	1 548
3	3 000	800	1 592
4	3 000	900	1 642
5	3 000	1 000	1 661
6	3 000	1 100	1 714
7	3 000	1 200	1 734
8	3 000	1 300	1 782
9	3 000	1 400	1 765
10	3 000	1 500	1 749
11	3 000	1 600	1 761

**Таблица 5** – Составы бетонных смесей

№ состава	Содержание компонентов, $\text{кг/м}^3$					
	Щ	П	ПЩ	ЗУ	СП	В
1	1 030	776	233	100	1 % $m_b$	200
2	1 030	776	233	100		200
3	1 030	776	300	33	0,8 % $m_b$	200
4	1 030	776	300	33		200

Подвижность бетонных смесей определена по стандартной методике с использованием нормального конуса. Физико-механические свойства бетонов определены по стандартным методикам. Прочностные показатели бетонов определены на образцах-кубах с размером ребра 0,1 м (предел прочности при сжатии). Образцы твердели в нормальных условиях при температуре  $t = 20 \pm 2$  °С и относительной влажности 100 % в течение 28 суток. Результаты испытаний приведены в таблице 6.

**Таблица 6** – Свойства бетонных смесей и бетонов

№ состава	Подвижность бетонной смеси, ОК, см	Средняя плотность бетона, $\rho_0, \text{кг/м}^3$	Предел прочности на сжатие, $R_{сж}, \text{МПа}$
1	14	2 307	41,5
2	12	2 281	38,5
3	6	2 218	34,6
4	7	2 236	30,5

## ВЫВОДЫ

Установлено, что при подборе количества и соотношения фракций крупного и мелкого заполнителей можно регулировать такие свойства бетонов, как плотность, прочность и, как следствие, долговечность.

Использование в составе бетонных смесей золы-уноса совместно с суперпластификатором позволяет получить смеси с подвижностью П2-П3. На величину подвижности влияет количество золы-уноса, наибольшие показатели у составов с 30 % заменой части портландцемента в составе вяжущего. Это связано со сферической формой зерен золы-уноса, что подтверждается исследованиями [5, 6].

Составы бетона №№ 1 и 2, содержащие 30 % золы-уноса и 1 % суперпластификатора отличаются более высокими значениями по средней плотности. Вероятно, это связано с тем, что с помощью пуццолановых сферических частиц золы создается так называемый эффект заполнения пор, что способствует увеличению плотности. Это подтверждается более высокими значениями пределов прочности при сжатии у данных составов.

Таким образом, использование золы-уноса Зуевской ТЭС в количестве 30 % взамен части цемента и суперпластификатора Р7 торговой марки «ГринТермо» позволяет получить бетоны с улучшенными характеристиками с применением мелкого заполнителя невысокого качества.

В дальнейшем предполагается исследовать морозостойкость и коррозионную стойкость предложенных составов бетонов и возможность их использования в конструкциях, испытывающих воздействие переменного уровня воды.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корсун, В. И. Современные методы повышения плотности и гидроизоляционных свойств бетона / В. И. Корсун, К. С. Никитина, С. А. Шатилова. – Текст : электронный // Новые идеи нового века. – 2020. – № 2020 (3). – С. 515–522. – URL: <https://pnu.edu.ru/media/nionc/articles-2020/515-522.pdf> (дата обращения 03.05.2021).
2. Стольников, В. В. Исследования по гидротехническому бетону / В. В. Стольников. – Москва : Госэнергоиздат, 1962. – 330 с. – Текст : непосредственный.
3. Грушко, И. М. Повышение прочности и выносливости бетона / И. М. Грушко, А. Г. Ильин, Э. Д. Чихладзе. – Харьков : Вища школа, 1986. – 149 с. – Текст : непосредственный.
4. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 30 сентября 2014 г. N 70-П) : взамен ГОСТ 8736-93 : дата введения 2015-04-01 / разработан Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский и проектно-изыскательский институт по проблемам добычи, транспорта и переработки минерального сырья в промышленности строительных материалов» (ФГУП «ВНИИПИИстромсырье»). – Москва : Стандартинформ, 2019. – 16 с. – Текст : непосредственный.
5. Modification of the Fine-Aggregate Concrete by High Disperse Silica Fume and Carbon Nanoparticles Containing Modifiers / S. S. Kiski, A. N. Ponomarev, I. V. Ageev, Cun Chang. – Текст : непосредственный // Advanced Materials Research. – 2014. – Volume 941–944. – P. 430–435.
6. Velichko, E. Modification of Foam Concrete with Organo-mineral Admixture / E. Velichko, O. Pustyl'nik. – Текст : электронный // Materials Science Forum. – 2019. – Volume 945. – P. 199–204. – URL: <https://www.scientific.net/MSF.945.199> (дата обращения: 01.11.2021).

Получена 14.12.2021

М. Е. ВОРОНЕНКО, А. А. СКИБИНА, О. В. ЄГОРОВА, С. В. ЛАХТАРИНА,  
І. Ю. ПЕТРИК  
ВАЖКИЙ БЕТОН ДЛЯ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД  
ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури»

**Анотація.** У статті дано теоретичне та експериментальне обґрунтування доцільності застосування пуццоланових цементів та хімічних добавок у складі важких бетонів. Для отримання найбільш щільного та довговічного бетону виконано підбір масового співвідношення крупного та дрібного заповнювачів. В результаті експериментальних досліджень встановлено, що при використанні великого заповнювача фракцій 5...10/10...20 мм оптимальна їх кількість та співвідношення становить 30/70 та 70/30 %. Заповнити залишковий міжзерновий простір доцільно дрібним заповнювачем за його вмістом 43 % від загальної маси всіх заповнювачів. Зокрема, використання у складі бетонних сумішей золи-віднесення Зуївської ТЕС у кількості 30 % замість цементу у складі комбінованого в'язучого та суперпластифікатора P7 торгової марки «Грін Термо» дозволяє отримати бетони з покращеними характеристиками при використанні дрібного заповнювача, який не відповідає вимогам нормативних документів.

**Ключові слова:** гідротехнічний бетон, склад бетону, зола-віднесення, суперпластифікатор, пустотність, рухливість, міцність.

MAXIM VORONENKO, ANASTASIA SKIBINA, ELENA YEGOROVA,  
SERGEY LAKHTARYINA, IRINA PETRIK  
HEAVY CONCRETE FOR HYDRAULIC STRUCTURES  
Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

**Abstract.** The article provides a theoretical and experimental justification of the feasibility of using pozzolan cements and chemical additives in heavy concrete. To obtain the most dense and durable concrete, the selection of the mass ratio of large and small aggregates was carried out. As a result of experimental studies, it was found that when using a large aggregate of fractions 5...10/10...20 mm, their optimal number and ratio is 30/70 % and 70/30 %. It is advisable to fill the residual intergranular space with a fine aggregate with its content of 43 % of the total mass of all aggregates. In particular, the use in the composition of concrete mixtures of fly ash from Zuevskaya TPP in the amount of 30 % instead of cement in the combined binder and superplasticizer P7 of the «Green Thermo» trademark makes it possible to obtain concretes

with improved characteristics when using fine aggregate that does not meet the requirements of regulatory documents.

**Key words:** hydraulic concrete, concrete composition, fly ash, superplasticizer, voidness, mobility, strength.

**Вороненко Максим Эдуардович** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны с высокими эксплуатационными характеристиками.

**Скибина Анастасия Андреевна** – магистрант кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: применение химических добавок в высокофункциональных бетонах.

**Егорова Елена Владимировна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: самоуплотняющиеся бетоны.

**Лахтарина Сергей Викторович** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: легкие высокопрочные бетоны.

**Петрик Ирина Юрьевна** – ассистент кафедры технологий строительных конструкций, изделий и материалов ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». Научные интересы: бетоны с обогащенной золой-уноса ТЭС.

**Вороненко Максим Едуардович** – магистрант кафедры технологий будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони з високими експлуатаційними характеристиками.

**Скібіна Анастасія Андріївна** – магистрант кафедры технологий будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: застосування хімічних добавок у високофункціональних бетонах.

**Егорова Елена Володимирівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони, що самоущільнюються.

**Лахтарина Сергій Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: легкі високоміцні бетони.

**Петрик Ирина Юрїївна** – асистент кафедри технологій будівельних конструкцій, виробів і матеріалів ДОУ ВПО «Донбаська національна академія будівництва і архітектури». Наукові інтереси: бетони із збагаченою золою-віднесення ТЕС.

**Voronenko Maxim** – master's student; Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: concretes with high performance characteristics.

**Skibina Anastasia** – master's student; Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: the use of chemical additives in high-functional concrete.

**Yegorova Elena** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: self-compacting concretes.

**Lakhtaryina Sergey** – Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: lightweight high strength concrete.

**Petrik Irina** – Assistant, Technologies of Building Structures, Products and Materials Department, Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture. Scientific interests: concrete with enriched fly ash from TPP.