Construction of Unique Buildings and Structures
journal homepage: www.unistroy.spbstu.ru`

doi: 10.18720/CUBS.79.1

Влияние комплексной органо-минеральной добавки на деформацию гидротехнических бетонов

Effect of complex organo-mineral additive on the deformation of hydrotechnical concrete

Лам Танг Ван, Нго Суан Хунг, Зиен Ву Ким, Булгаков Б.И.

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия

Lam Tang, Xuan Hung Ngo, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I.

National Research Moscow State Civil Engineering University, Moscow, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

гидротехнический бетон;
сульфатостойкий портландцемент;
зола-уноса;
микрокремнезем;
относительная деформация;
прочность на сжатие;
комплексная органо-минеральная добавка;
экспериментальная модель;
регрессионное уравнение;

KEYWORDS

hydrotechnical concrete;
sulfate-resistant Portland cement;
fly ash;
microsilica;
deformation;
complex organo-mineral additive;
experimental model;
objective function;

АННОТАЦИЯ

В статье приведены результаты исследования свойств бетона, который может быть использован для строительства морских гидротехнических сооружений, предварительный состав которого был определён с помощью стандарта ACI 211.4R-2008. Также было изучено влияние водо-вяжущего отношения (В/Вяж) и эффекта использования разработанной комплексной органо-минеральной модифицирующей добавки, состоящей из золы-уноса ТЭС «Вунг Анг» (ЗУ), микрокремнезема SF-90 (МК90) и поликарбоксилатного суперпластификатора SR 5000F (СП) на относительные деформации бетонных образцов-балочек в результате их экспозиции в 5 %-ном водном растворе сульфата натрия. Для обработки полученных результатов применялся метода математического планирования эксперимента с построением четырехфакторного плана. В результате математической обработки результатов предварительных исследований было получено регрессионное уравнение первого порядка зависимости целевой функции – относительной деформации бетонных образцов в жидкой сульфатной среде от входных факторов – x_1 (В/Вяж), x_2 (количества ЗУ), x_3 (количества МК90) и x_4 (количества СП), а также изображения поверхности выражения этого регрессионного уравнения. Из полученного регрессионного уравнения следует, что водо-вяжущее отношение и содержание ЗУ, а также содержание МК90 оказывают значительное влияние на относительную деформацию бетона. Увеличение относительной деформации бетонных образцов при увеличении содержания золы-уноса можно объяснить значительным количеством топливной золы (от 20 до 40 % массы цемента), содержащей 24,17 % Al_2O_3 и 6,15 % Fe_2O_3, которые под воздействием жидкой сульфатной среды и растворённого $Ca(OH)_2$ способствует образованию в капиллярах цементного камня бетона высокообводнённых гидросульфоалюминатов и гидросульфоферритов кальция с большим мольным объёмом.

ABSTRACT

This paper presents the experimental results of an investigation on the effect of the water-binding ratio (W/B) and the complex organo-mineral modifying additive, consisting of fly ash (FA) TPP «Vung Ang», silica fume SF-90 (SF90) and polycarboxylate superplasticizer SR 5000F (SR5000) on the deformations of concrete specimens fully immersed in 5 % sodium sulfate solution according to Russian standard GOST P 56687-2015. In addition, using the mathematical planning method for four factors and the Matlab program was obtained the first-order regression equation of the mathematical model, which was adequately described the influence of the W/B, FA, SF90 and SR5000 contents on the deformation of concrete. The experimental results of the present study

demonstrated that the effect of FA content is more pronounced than the water-binding ratio and content SF90. In addition, the effect of SR5000 content on the deformation of concrete is negligible, so it was discarded. The increase in the deformation of concrete samples with an increase in the fly ash content can be explained by a significant fly ash content (from 20 to 40 % by mass of cement) containing 24.17 % Al_2O_3 and 6.15 % Fe_2O_3, which are under the influence of a liquid sulphate medium and $Ca(OH)_2$ promotes the formation of high-water of calcium hydro sulfoaluminate and calcium hydrosulfoferrites with a large-volume in capillaries of concrete.

Содержание

1. Введение 8
2. Материалы и методы 8
3. Результаты исследования 10
4. Заключение 16

1. Введение

Коррозионностойкий бетон применяется, в том числе, так же и для строительства гидротехнических сооружений, поскольку они должны обладать необходимой стойкостью к воздействию пресных и солёных агрессивных водных сред [1–3].

По мнению автора работы [4, 5] в XXI веке основной объём гидротехнического строительства в мире придётся на просторы океана и, в первую очередь, на прибрежную и шельфовую его зоны. Конструкции гидротехнических сооружений – бетонные опоры мостов, плотины гидроэлектростанций, входные и выходные порталы водоприёмных и водосбросных туннелей, подпорные стены – подвергаются систематическому увлажнению, воздействию знакопеременных температур и гидроабразивному истиранию. Зачастую воды, воздействующие на бетонные конструкции гидротехнических сооружений, являются агрессивными по отношению к бетону. При этом, наиболее распространённой является агрессивная сульфатосодержащая среда, которая может стать причиной возникновения внешней сульфатной коррозии бетона [6–8]. Важно отметить, что угроза и риск преждевременного разрушения бетона в конструкциях гидротехнических сооружений в результате воздействия коррозионных процессов возрастают при одновременном протекании внутренней щелочной коррозии заполнителей и внешней сульфатной коррозии бетона [9–11]. Согласно [12–15], эффективность бетона против сульфатной атаки связана с его проницаемостью и плотностью.

В сульфидных и морских средах сульфатная атака в структуре бетона. Деформация гипса и эттрингита, образовавшегося в процессе реакций сульфатных ионов, привела к снижению прочности бетона и, возможно, полностью поврежденных структур [16–18].

$$Na_2SO_4.2H_2O + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH$$

$$Na_2SO_4.2H_2O + C\text{-}S\text{-}H \rightarrow CaSO_4.2H_2O + N\text{-}S\text{-}H$$

$$C_4AH_{13} + 3CaSO_4.2H_2O + 14H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O + Ca(OH)_2$$

$$C_3A.3CaSO_4.12H_2O + 2CaSO_4.2H_2O + 16H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O$$

По данным работ [19–21] деформация бетона в агрессивной коррозионной среде зависит в основном от состава бетонной смеси, от типа используемого цемента и применения органо-минеральных модифицирующих добавок, уплотняющих структуру твердеющих бетонов. В связи с этим, исследования влияния комплексных органо-минеральных модификаторов структуры на плотность, прочность и стойкость бетонов морских сооружений к сульфатной коррозии представляют значительный интерес [22–24].

В данной работе приведены результаты исследования стойкости к сульфатной коррозии образцов из бетона на основе сульфатостойкого цемента, содержащего комплексную органо-минеральную модифицирующую добавку, состоящую из золы-уноса ТЭС «Вунг Анг» (Вьетнам), микрокремнезема и водоредуцирующего поликарбоксилатного суперпластификатора SR 5000F и пригодного для строительства морских гидротехнических сооружений.

2. Материалы и методы

2.1. Материалы. Использованные сырьевые материалы:

1 – Сульфатостойкий портландцемент (Ц) типа ЦЕМ I СС 42,5Н производства завода «Бут Сон» (Вьетнам) с истинной плотностью 3,15 г/м^3. Результаты анализа использованного портландцемента приведены в таблицах 1 и 2.

Лам Танг Ван, Нго Суан Хунг, Зиен Ву Ким, Булгаков Б.И. Влияние комплексной органо-минеральной добавки на деформацию гидротехнических бетонов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 4(79). С.7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

Таблица 1. Минеральный состав и физико-механические характеристики портландцемента ЦЕМ I СС 42,5 Н.

Минеральный состав, % масс.					Нормальная густота, %	Сроки схватывания, мин.		Прочность на сжатие, МПа	
C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	др.		начало	конец	2 суток	28 суток
56,5	24,65	3,25	12,4	3,2	29,5	125	258	20,5	50,4

2 – Зола-уноса (ЗУ) ТЭС «Вунг Анг» (Вьетнам) класса F и микрокремнезем SF-90 (МК90) производства фирмы «Vina Pacific» (Вьетнам). Химический состав и физические характеристики использованных тонкодисперсных материалов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Химический состав и физические характеристики сульфатостойкого портландцемента, ЗУ ТЭС «Вунг Анг» и МК90.

Средний химический состав, % масс.	ЗУ ТЭС «Вунг Анг»	МК90	Сульфатостойкий портландцемент
SiO_2	54,62	91,65	21,4
Al_2O_3	24,17	2,25	4,4
Fe_2O_3	6,15	2,47	5,2
SO_3	2,81	–	3,5
K_2O	1,28	–	0,5
Na_2O	1,25	0,58	1,3
MgO	1,57	–	2,5
CaO	1,48	0,51	58,7
P_2O_5	1,63	–	–
п.п.п.*	5,04	2,54	2,5
Средний размер частиц, мкм	7,18	0,243	8,365
Истинная плотность, г/см^3	2,35	2,15	3,15
Насыпная плотность, кг/м^3	572	765	1100
Удельная поверхность, м^2/г	5,35	14,46	0,366

Примечание: * п.п.п. – потери при прокаливании.

3 – Кварцевый песок (П) реки Ло (Вьетнам) с модулем крупности M_K = 2,95, истинной плотностью 2,65 г/см^3 и средней насыпной плотностью в уплотненном состоянии 1540 кг/м^3.

С помощью метода лазерной гранулометрии был определен гранулометрический состав использованных ЗУ, МК90, цемента и песка, представленный на рисунках 1 и 2.

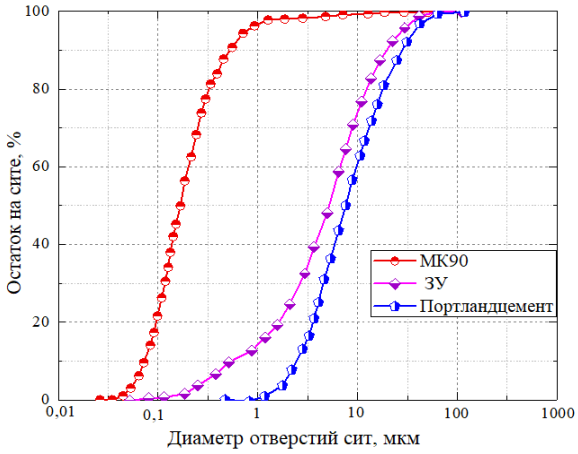


Рисунок 1. Гранулометрический состав ЗУ, МК90 и цемента.

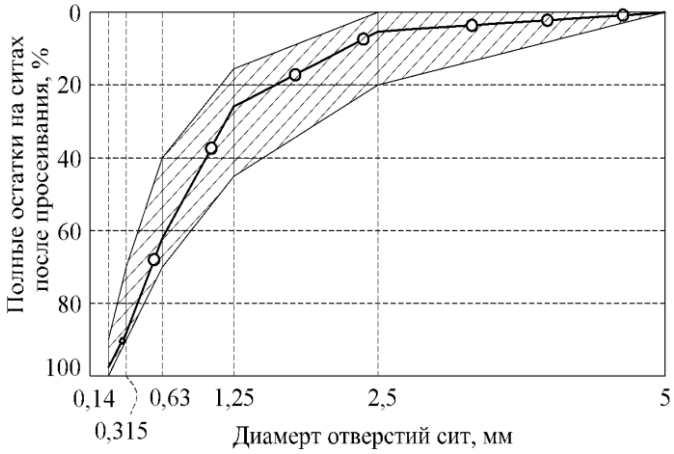


Рисунок 2. Гранулометрический состав кварцевого песка реки Ло.

Lam Tang, Xuan Hung Ngo, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I. Effect of complex organo-mineral additive on the deformation of hydrotechnical concrete. Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. 4(79). Pp. 7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

4 – Гранитный щебень (Щ) из карьера «Киен Кхе» (Вьетнам) с D_{max} = 10 мм, истинной плотностью 2,65 г/см^3 и насыпной плотностью в уплотненном состоянии 1580 кг/м^3.

5 – Поликарбоксилатный суперпластификатор (СП) SR 5000F производства фирмы «SilkRoad» (Корея) с плотностью 1,1 г/м^3 при температуре 20 ± 5 °С.

6 – Водопроводная вода в качестве воды затворения для получения бетонной смеси.

2.2. Методология. Использованные методы исследований:

– для определения предварительного состава высокоподвижной бетонной смеси использовали стандарт ACI 211.4R-2008 (США) [25].

– исследования влияния водо-вяжущего отношения и комплексной органо-минеральной добавки на относительную деформацию бетонных образцов в жидкой сульфатной среде проводили с помощью метода математического планирования эксперимента путем построения четырёхфакторного плана первого порядка [26–29];

– гранулометрический состав порошкообразных сырьевых компонентов определяли методом лазерной гранулометрии с помощью лазерного анализатора частиц Coulter LS Particle Size Analyzer (США);

– исследование микроструктуры бетона проводилось с помощью сканирующего электронного микроскопа Quanta-450 (Япония) в Институте высоких технологий Ханойского горно-геологического университета;

– подвижность бетонной смеси оценивали по ГОСТ 10181–2014 по осадке конуса (ОК) в сантиметрах с помощью стандартного конуса размером 100×200×300 мм;

– среднюю плотность бетона определяли на образцах – кубах размером 100×100×100 мм согласно ГОСТ 12730.1–78;

– прочность бетонов на сжатие определяли испытанием образцов-кубов указанного выше размера, а на растяжение при изгибе на образцах – призмах размером 100×100×400 мм в соответствии с требованиями ГОСТ 10180–2012;

– модуль упругости бетона определяли по его прочности на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения в соответствии с требованиями ACI 318–2005 [30];

– марку бетонов по водонепроницаемости определяли на образцах цилиндрической формы с диаметром 150 мм и высотой 150 мм согласно ГОСТ 12730.5–84 по методу «мокрого пятна» [31];

– определение деформации бетона в жидкой сульфатной среде проводили по ГОСТ Р 56687–2015 [32] на образцах размером 25×25×254 мм.

3. Результаты исследования

3.1. Определения предварительного состава бетонной смеси

Разрабатываемый бетон должен обладать:

– удобоукладываемостью бетонной смеси по осадке стандартного конуса ОК = 9÷15 см;

– прочностью на сжатие в возрасте 28 суток порядка 50 МПа [14];

– возможностью использования золы-уноса для замены 30 % масс. портландцемента в бетонной смеси [25];

– количество поликарбоксилатного суперпластификатора SR 5000F, ровной 1 % масс. портландцемента [2, 33];

– водо-вяжущее отношение $\frac{В}{Вяж}$ = 0,3 [21];

– объём вовлечённого воздуха, ровной 2 % [14, 25].

С помощью стандарта ACI 211.4R-2008 результаты определения предварительного состава бетонной смеси представлены в таблице 3. Свойства полученного на её основе бетона приведены в таблице 4.

Лам Танг Ван, Нго Суан Хунг, Зиен Ву Ким, Булгаков Б.И. Влияние комплексной органо-минеральной добавки на деформацию гидротехнических бетонов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 4(79). С.7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

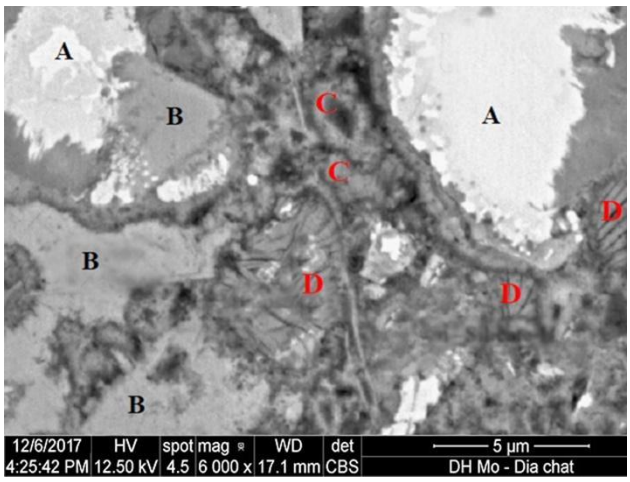
Таблица 3. Состав и свойства бетонной смеси.

Расход материалов на 1 м^3 бетонной смеси, кг							$\frac{В}{Вяж}$	ОК, см	Средняя расчётная плотность бетонной смеси, кг/м^3
Ц	П	Щ	ЗУ	МК90	СП	В			
403	595	1027	121	40,3	4,0	169	0,3	15,0	2359,3

Таблица 4. Физико-механические и эксплуатационные показатели бетона.

Средняя прочность на сжатие в разных возрастах твердения, МПа					Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут., МПа	Средняя плотность, кг/м^3	Водонепроницаемость в возрасте 28 суток, МПа	Модуль упругости, МПа
1 сут.	3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.				
22,6	33,8	45,4	50,2	57,2	4,15	2285	0,6	35773

Результаты анализа микроструктуры бетона разработанного состава в возрасте 28 суток нормального твердения, полученные с помощью метода электронной микроскопии (Quanta-450), проводившейся в Институте высоких технологий Ханойского горно-геологического университета, представлены на рисунке 3.



A – остаточный портландцемент.

B – гидроксид кальция.

C – эттрингит.

D – гидросиликат кальция.

Рисунок 3. Микроструктура бетона разработанного состава в возрасте 28 суток нормального твердения (увеличение x6000).

Для последующего исследования влияния водо-вяжущего отношения $\left(\frac{В}{Вяж}\right)$ и комплексной органо-минеральной добавки на относительную деформацию бетонов с помощью метода математического планирования эксперимента $\frac{В}{Вяж}$ было выбрано в пределах от 0,26 до 0,34. Количества ЗУ, МК90 и СП в составе бетонной смеси варьировались в пределах, соответственно, от 20 до 40 %, от 5 до 15 % и от 0,5 до 1,5 % от массы портландцемента [34–36], а расходы П и Щ были постоянными и равными, соответственно, 595 кг и 1027 кг [36, 37].

3.2. Построение математической модели планирования эксперимента первого порядка

В этой работе был использован метод математического планирования эксперимента первого порядка для четырех факторов. Его структура представлена на рисунке 4.

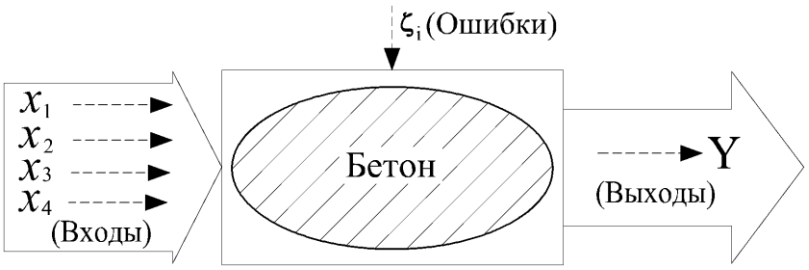


Рисунок 4. Структура планирования эксперимента первого порядка для четырех факторов.

Lam Tang, Xuan Hung Ngo, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I. Effect of complex organo-mineral additive on the deformation of hydrotechnical concrete. Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. 4(79). Pp. 7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

В качестве выходящей целевой функции Y экспериментальной модели, определяемой по формуле (1), была выбрана относительная деформация (ε_{28}, %) бетонных образцов размером 25×25×254 мм после 28 суток испытаний в 5 %-ном водном растворе сульфата натрия.

$$У = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \beta_4 x_4 + \beta_5 x_1.x_2 + \beta_6 x_1.x_3 + \beta_7 x_1.x_4 + \beta_8 x_2.x_3 + \beta_9 x_2.x_4 + \beta_{10} x_3.x_4 + \beta_{11} x_1.x_2.x_3 + \beta_{12} x_1.x_2.x_4 + \beta_{13} x_1.x_3.x_4 + \beta_{14} x_2.x_3.x_4 + \beta_{15} x_1.x_2.x_3.x_4. \quad (1)$$

где β_0, β_1, β_2, β_3, β_4, … и β_{15} – коэффициенты регрессионного уравнения.

В виде входных факторов были выбраны:

– x_1 – отношение $\frac{В}{Вяж}$ в пределах от 0,26 до 0,34:

– x_2 – количество ЗУ в пределах от 20 % до 40 % от массы Ц;

– x_3 – количество МК90 в пределах от 5 % до 15 % от массы Ц.

– x_4 – количество СП в пределах от 0,5 % до 1,5 % от массы Ц;

Входные факторы и интервалы их варьирования приведены в таблице 5.

Таблица 5. Уровни входных факторов и интервалы их варьирования в планировании первого порядка.

Входные факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
В натуральном виде	В виде переменных	–1	0	+1	
Отношение $\frac{В}{Вяж}$	x_1	0,26	0,30	0,34	0,04
Количество ЗУ, %	x_2	5	10	15	05
Количество МК90, %	x_3	20	30	40	10
Количество СП, %	x_4	0,5	1	1,5	0,5

В соответствии с данными работ [26–29] число опытов для четырех входных факторов в планировании первого порядка определяется по формуле (2):

$$N = 2^k, \quad (2)$$

где k – число факторов и k = 4.

Следовательно: $N = 2^4 = 16$.

Составы бетонной смеси, рассчитанные с помощью метода математического планирования первого порядка, приведены в таблице 6, значения относительной деформации бетонных-образцов после 28 суток испытаний в жидкой сульфатной среде – в таблице 7.

Таблица 6. Составы бетонных смесей, рассчитанные с помощью метода математического планирования первого порядка.

№ п/п	В виде переменных				В натуральном виде				Составы бетонных смесей, кг/м^3						
	x_1	x_2	x_3	x_4	$\frac{В}{Вяж}$	ЗУ, %	МК90, %	СП, %	Ц	П	Щ	ЗУ	МК90	СП	В
1	+	+	+	+	0,34	40	15	1,5	338	595	1.027	135	50,7	5,1	178
2	–	+	+	+	0,26	40	15	1,5	381	595	1.027	152	57,1	5,7	153
3	+	–	+	+	0,34	20	15	1,5	392	595	1.027	78	58,9	5,9	180
4	–	–	+	+	0,26	20	15	1,5	443	595	1.027	89	66,5	6,6	156
5	+	+	–	+	0,34	40	5	1,5	364	595	1.027	146	18,2	5,5	180
6	–	+	–	+	0,26	40	5	1,5	411	595	1.027	165	20,6	6,2	155
7	+	–	–	+	0,34	20	5	1,5	429	595	1.027	86	21,4	6,4	182
8	–	–	–	+	0,26	20	5	1,5	485	595	1.027	97	24,3	7,3	158
9	+	+	+	–	0,34	40	15	0,5	341	595	1.027	136	51,1	1,7	179
10	–	+	+	–	0,26	40	15	0,5	384	595	1.027	154	57,6	1,9	155
11	+	–	+	–	0,34	20	15	0,5	396	595	1.027	79	59,4	2,0	182
12	–	–	+	–	0,26	20	15	0,5	448	595	1.027	90	67,2	2,2	157
13	+	+	–	–	0,34	40	5	0,5	368	595	1.027	147	18,4	1,8	181
14	–	+	–	–	0,26	40	5	0,5	416	595	1.027	166	20,8	2,1	157
15	+	–	–	–	0,34	20	5	0,5	434	595	1.027	87	21,7	2,2	184
16	–	–	–	–	0,26	20	5	0,5	491	595	1.027	98	24,5	2,5	160

Лам Танг Ван, Нго Суан Хунг, Зиен Ву Ким, Булгаков Б.И. Влияние комплексной органо-минеральной добавки на деформацию гидротехнических бетонов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 4(79). С.7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

Таблица 7. Относительная деформация бетонных образцов после 28 суток испытаний в жидкой сульфатной среде.

№ п/п	В натуральном виде				Относительная деформация $Y = \varepsilon_{28}$, %						Ошибки дисперсии
	$\frac{В}{Вяж}$	ЗУ, %	МК90, %	СП, %	$\varepsilon_1 \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon_2 \cdot 10^{-2}$	$\varepsilon_3 \cdot 10^{-2}$	$Y_i^{ср} \cdot 10^{-2}$	$\overline{Y}_i \cdot 10^{-2}$	$(Y_i^{ср} - \overline{Y}_i)^2 \cdot 10^{-6}$	$S_i^2 \cdot 10^{-7}$
1	0,34	40	15	1,5	3,42	3,52	3,51	3,483	3,497	0,0002	3,03
2	0,26	40	15	1,5	1,92	2	1,95	1,957	2,623	44,3334	1,63
3	0,34	20	15	1,5	1,41	1,45	1,42	1,427	1,701	7,5167	0,43
4	0,26	20	15	1,5	1,08	1,15	1,16	1,130	0,826	8,4827	1,90
5	0,34	40	5	1,5	4,31	4,35	4,2	4,287	4,201	1,2284	6,03
6	0,26	40	5	1,5	3,12	3,3	3,24	3,220	3,326	0,8789	8,40
7	0,34	20	5	1,5	1,52	1,55	1,56	1,543	2,405	72,0377	0,43
8	0,26	20	5	1,5	1,34	1,32	1,35	1,337	1,530	3,7378	0,23
9	0,34	40	15	0,5	3,51	3,56	3,64	3,570	3,497	0,7296	4,30
10	0,26	40	15	0,5	2,8	3,1	2,94	2,947	2,623	10,5084	22,53
11	0,34	20	15	0,5	1,56	1,43	1,51	1,500	1,701	4,0334	4,30
12	0,26	20	15	0,5	1,28	1,31	1,25	1,280	0,826	19,4702	0,90
13	0,34	40	5	0,5	4,35	4,65	4,05	4,350	4,201	3,0334	90,00
14	0,26	40	5	0,5	3,25	3,47	3,42	3,380	3,326	0,4389	13,30
15	0,34	20	5	0,5	3,34	3,5	3,2	3,347	2,405	91,1229	22,53
16	0,26	20	5	0,5	1,38	1,35	1,35	1,360	1,530	2,8900	0,30
	$\text{Max } S^2 = 9 \cdot 10^{-6}$				$\sum (Y_i^{ср} - \overline{Y}_i)^2 = 27,467 \cdot 10^{-5}$					$S_{ll}^2 = \sum S_i^2 = 180,266 \cdot 10^{-7}$	

а*). *Проверка воспроизводимости опытов

По данным использованиям [27–29] гипотезу о воспроизводимости опытов (об однородности дисперсий) проверяли с помощью критерия Кохрена ($G_{расс}$). Расчетное значение критерия Кохрена вычисляли по формуле (3):

$$G_{расс} = \frac{\max S^2}{\sum S_i^2}. \quad (3)$$

Критическое значение критерия Кохрена $G_{кр} = G_{\alpha}(f_1, f_2)$ находили по таблице 4.36 распределения Кохрена [38] в зависимости от значений:

– степеней свободы числителя $f_1 = 4 - 1 = 4 - 1 = 3$;

– знаменателя $f_2 = N = 16$;

– уровня значимости $\alpha = 0,05$.

Тогда: $G_{кр} = 0,5466$.

Учитывая значения относительной деформации бетонных образцов, получаем:

$$S_{ll}^2 = \sum S_i^2 = 180,266 \cdot 10^{-7} \text{ и } \max S^2 = 9 \cdot 10^{-6} \rightarrow G_{расс} = \frac{S_{max}^2}{\sum S_i^2} = \frac{9 \cdot 10^{-6}}{180,266 \cdot 10^{-7}} = 0,4992.$$

и $G_{расс} = 0,4992 < G_{кр} = 0,5466$.

Следовательно, гипотеза об однородности дисперсий принимается.

б*). *Составление регрессионного уравнения первого порядка

С помощью компьютерной программы *Matlab* было получено регрессионное уравнения (4):

$$\begin{aligned} Y = {} & 0,02507 + 0,00431x_1 + 0,00892x_2 - 0,00346x_3 - 0,00209x_4 + 0,00092x_1 x_2 - 0,00098x_1 x_3 - \\ & - 0,00044x_1 x_4 - 0,00064x_2 x_3 + 0,00047x_2 x_4 + 0,00047x_3 x_4 - 0,00112x_1 x_2 x_3 - \\ & - 0,001696x_1 x_2 x_4 + 0,00166x_1 x_3 x_4 - 0,00154x_2 x_3 x_4 - 0,00066x_1 x_2 x_3 x_4. \end{aligned} \quad (4)$$

Lam Tang, Xuan Hung Ngo, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I. Effect of complex organo-mineral additive on the deformation of hydrotechnical concrete. Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. 4(79). Pp. 7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

в). Проверка значимости коэффициентов уравнения (4)

Проверка значимости коэффициентов уравнения (4) проводится по критерию Стьюдента ($t_\alpha\,(f_2)$). Коэффициент β_j считается значимым, если:

$$t_{\beta j} \geq t_\alpha(f_2), \tag{5}$$

где $t_\alpha\,(f_2)$ – критическое значение распределения Стьюдента.

При значимом уровне α = 0,025 и степени свободы $f_2 = N(k-1)$ = 16 (4 – 1) = 48 из таблицы 3.2 [38] следует, что $t_{0,025}\,(48)$ = 2,4066.

Значения критерия Стьюдента $t_{\beta j}$ для коэффициентов β_j определяются по формуле (6):

$$t_{\beta j} = \frac{\left|\beta_j\right|}{S_{bj}} \Rightarrow \left|\beta_j\right| = t_{\beta j} \times S_{\beta j}. \tag{6}$$

Оценки дисперсии коэффициентов уравнения регрессии $S_{\beta j}$ определяются по формуле (7):

$$S_{\beta j} = \sqrt{\frac{S_{ll}{}^2}{N}}, \tag{7}$$

где N – число всех возможных испытаний.

По критерию Стьюдента $t_{\beta j} \geq t_\alpha(f_2)$ и в нем $t_{\beta j} = \dfrac{\left|\beta_j\right|}{S_{\beta j}} \Rightarrow \left|\beta_j\right| \geq t_\alpha(f_2) \times S_{\beta j}$.

Таким образом, полученный коэффициент βj регрессионного уравнения считается значимым, если: $\left|\beta_j\right| \geq t_{0,025}(48) \times S_{\beta j} = 2,4066 \times S_{\beta j}$.

Для уравнения регрессии (4) при $S^2_{ll} = \sum S_i^2$ = 180,266 · 10^{-7} и N = 16 получаем:

$$S_{\beta j} = \sqrt{\frac{180,266 \cdot 10^{-7}}{16}} = 0,00106 \quad \text{и} \quad \left|\beta_j\right| \geq 2,4066 \times 0,00106 = 0,0025545.$$

После проверки значимости коэффициентов незначимые коэффициенты были отброшены, в результате чего получено следующее уравнение (8):

$$Y = 0,02507 + 0,00431x_1 + 0,00892x_2 - 0,00346x_3. \tag{8}$$

д). Проверка адекватности уравнения (8)

Проверка гипотезы об адекватности модели основана на расчетах дисперсии адекватности S^2_{ad} (9) и критерия Фишера $F_{\text{расс}}$ (10):

$$S^2_{\text{ад}} = \frac{\sum (Y_i^{\text{ср}} - \overline{Y_i})^2}{N - m}; \tag{9}$$

$$F_{\text{расс}} = \frac{S^2_{\text{ад}}}{S^2_{ll}}, \tag{10}$$

где $\overline{Y_i}$ – рассчитанное по уравнению регрессии значение отклика;

N – число всех возможных испытаний, N = 16;

m – число оцениваемых коэффициентов регрессии (8), m = 4.

S^2_{ll} – оценка дисперсии воспроизводимости эксперимента, определяемая по формуле (11):

Лам Танг Ван, Нго Суан Хунг, Зиен Ву Ким, Булгаков Б.И. Влияние комплексной органо-минеральной добавки на деформацию гидротехнических бетонов // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2019. № 4(79). С.7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

$$S_{ll}^2 = \sum S_i^2. \quad (11)$$

Рассчитанное значение $F_{\text{таб}}(f_1, f_2)$ следует сравнить со значением из таблицы 3.5 [38], определяемым числами степеней свободы $f_1 = N$ = 16 и $f_2 = N - m$ = 16 – 4 = 12 при значимом уровне α = 1 %. Таким образом, критическое значение: $F^{(16,12)}_{\text{табл}}$ = 4,0096.

Для уравнения регрессии (8):

$$\sum (Y_i^{\text{ср}} - \overline{Y}_i)^2 = 27,467 \cdot 10^{-5},\ S_{\text{ад}}^2 = \frac{27,467 \cdot 10^{-5}}{16-4} = 2,288 \cdot 10^{-5} \text{ и } S_{ll}^2 = 180,266.10^{-7}.$$

Таким образом: $F_{\text{расс}} = \dfrac{S_{\text{ад}}^2}{\sum S_{ii}^2} = \dfrac{2,288 \cdot 10^{-5}}{180,266 \cdot 10^{-7}} = 1,269.$

T.k. $F_{\text{расс}}$ = 1,269 < $F^{(16,11)}_{\text{табл}}$ = 4,0096, то экспериментальная модель, описываемая уравнением (8), является адекватной.

С помощью компьютерной программы Matlab были получены изображения поверхности выражения целевой функции для регрессионного уравнения (8), представленные на рисунках 5–7.

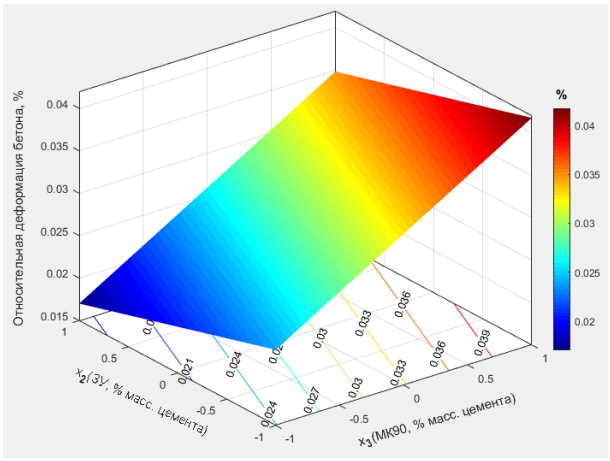


Рисунок 5. Изображение поверхности регрессионного уравнения первого порядка (8) при x_1 = 1.

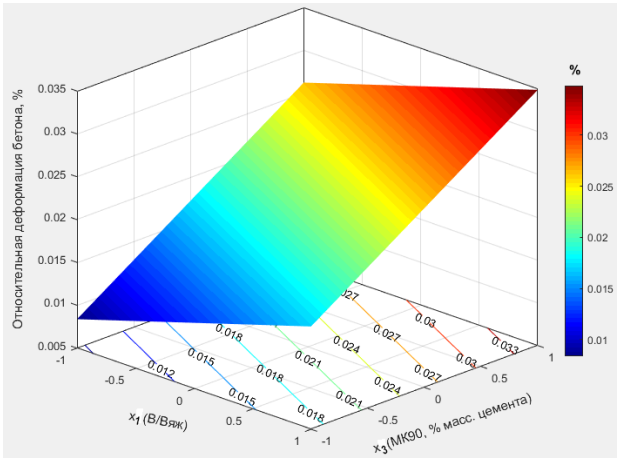


Рисунок 6. Изображение поверхности регрессионного уравнения первого порядка (8) при x_2 = 1.

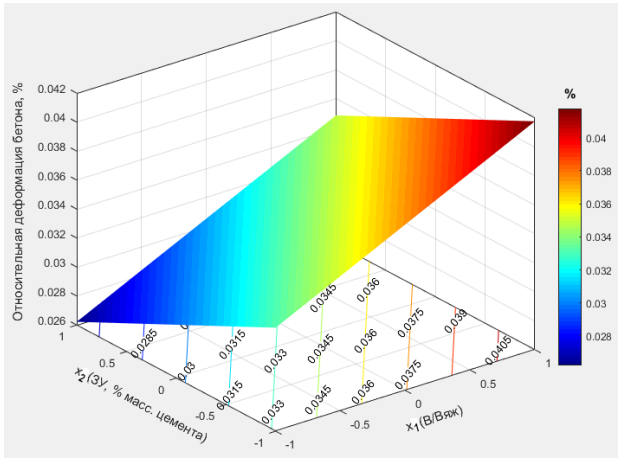


Рисунок 7. Изображение поверхности регрессионного уравнения первого порядка (8) при x_3 = 1.

Lam Tang, Xuan Hung Ngo, Vu Kim Dien, Bulgakov B.I. Effect of complex organo-mineral additive on the deformation of hydrotechnical concrete. Construction of Unique Buildings and Structures. 2019. 4(79). Pp. 7-19. DOI: 10.18720/CUBS.79.1

Из регрессионного уравнения (8) следует, что при увеличении соотношения $\frac{\text{В}}{\text{Вяж}}$ (x_1) и количества ЗУ (x_2), а также с уменьшением количества ЗУ (x_3) относительная деформация бетонных образцов после 28 суток испытаний в жидкой сульфатной среде возрастает. Увеличение относительной деформации бетонных образцов с ростом содержания в них золы-уноса можно объяснить существенным её расходом (от 20 до 40 % массы цемента) и тем, что в ней содержится 24,17 % Al_2O_3 и 6,15 % Fe_2O_3, которые в условиях воздействия жидкой сульфатной среды с растворённым гидроксидом кальция, выделяющийся в ходе гидратации цемента, способствует образованию в капиллярах цементного камня бетона высокообводнённых гидросульфоалюминатов и гидросульфоферритов кальция ($3CaO.Al_2O_3.xCaSO_4.mH_2O$ и $3CaO.Fe_2O_3.yCaSO_4.nH_2O$) с большим мольным объёмом, в том числе и эттрингита по следующим реакциям [15, 21–24]:

$$Ca(OH)_{2\ (\text{при гидратации цемента})} + Al_2O_{3\ (\text{в ЗУ})} + CaSO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.Al_2O_3.3CaSO_4.(30\div32)H_2O$$
$$\text{или } 3CaO.Al_2O_3.xCaSO_4.mH_2O$$

$$Ca(OH)_{2\ (\text{при гидратации цемента})} + Fe_2O_{3\ (\text{в ЗУ})} + CaSO_4.2H_2O \rightarrow 3CaO.Fe_2O_3.3CaSO_4.(30\div32)H_2O$$
$$\text{или } 3CaO.yFe_2O_3.CaSO_4.nH_2O$$

Влияние СП (x_4) в рассматриваемом диапазоне концентраций (от 0,5 до 1,5 % массы портландцемента) на относительную деформацию образцов при их экспозиции в жидкой сульфатной среде незначительно и поэтому им можно пренебречь.

4. Заключение

На основании полученных экспериментальных результатов можно сделать следующие выводы:

1. С помощью стандарта ACI 211.4R-2008 был разработан состав высокоподвижной бетонной смеси, позволяющей получить бетон из преимущественно местных для Вьетнама сырьевых материалов со структурой, модифицированной комплексной органо-минеральной добавкой, обладающий высокой прочностью на сжатие, равной 57,2 МПа, и на растяжение при изгибе – 4,15 МПа в возрасте 28 суток нормального твердения и водонепроницаемость в возрасте 28 суток, равной 0,6 МПа, а также модулем упругости 35773 МПа, который может быть использован для строительства морских гидротехнических сооружений в прибрежной зоне Вьетнама.

2. Методом математического планирования эксперимента и с помощью компьютерной программы Matlab было получено регрессионное уравнение (8) и изображения поверхности выражения целевой функции, представленные на рисунках 5–7. Полученное регрессионное уравнение адекватно описывает зависимость относительной деформации бетонных-образцов после 28 суток испытаний в жидкой сульфатной среде от переменных $x_1 \left(\frac{\text{В}}{\text{Вяж}}\right)$, x_2 (количества ЗУ), x_3 (количества МК90) и x_4 (количества СП).

3. В исследуемом диапазоне значений соотношение $\frac{\text{В}}{\text{Вяж}}$, содержание ЗУ, а также содержание МК90 оказывают значительное влияние на относительную деформацию бетонных образцов в результате их испытания в 5 % – ном водном растворе Na_2SO_4. Кроме того, влияние содержания СП на относительную деформацию бетонных образцов в рассматриваемом диапазоне значений (от 0,5 до 1,5 % массы портландцемента) незначительно и поэтому им можно пренебречь. Увеличение относительной деформации бетонных образцов при увеличении содержания в них золы-уноса можно объяснить существенным расходом топливной золы (от 20 до 40 % массы цемента) и содержанием в ней 24,17 % Al_2O_3 и 6,15 % Fe_2O_3. Эти оксиды в результате химических реакций, происходящих в жидкой сульфатной среде, содержащей растворенный гидроксид кальция, способствуют образованию высокообводнённых гидросульфоалюминатов и гидросульфоферритов кальция, обладающих большим мольным объёмом.

4. Использованный в этой работе микрокремнезём, состоящий на 91,65 % из аморфного диоксида кремния, связывает свободный гидроксид кальция в менее растворимые низкоосновные гидросиликаты, в результате чего уплотняется структура бетона и уменьшаются деформаций бетонных образцов, а также повышаются его сульфатостойкость, что подтверждается результатами проведённых испытаний.

Литература

[1] Ануфриева Е.В. Коррозионностойкий бетон для гидротехнического строительства // Градостроительные аспекты устойчивого развития крупных городов. 2009.

References

[1] Anufriyeva Ye.V. Korrozionnostoykiy beton dlya gidrotekhnicheskogo stroitel'stva [Corrosion Resistant Concrete for Hydraulic Engineering]. Gradostroitel'nyye aspekty ustoychivogo razvitiya krupnykh gorodov

№ 93. С. 537–541.

[2] Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Yuri Bazhenov. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 365, 032007. URL: https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032007.

[3] Зафировски З., Папик Й., Пешевски И. Анализ устойчивости отдельных блоков во время разработки горного массива для гидротехнического объекта // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 5(32). С. 141–149.

[4] Mehta K.P. Concrete in the marine environment. Taylor & Francis Books, 2003, 216 p.

[5] Танг Ван Лам, Нго Суан Хунг, Ву Ким Зиен, Нгуен Чонг Чык, Булгаков Б.И., Баженова О.Ю., Гальцева Н.А. Влияние водовяжущего отношения и комплексной органоминеральной добавки на свойства бетона для морских гидротехнических сооружений // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 11–21. URL: https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.03.11-21

[6] Сафаров К.Б., Степанова В.Ф., Фаликман В.Р. Влияние механоактивированной низкокальциевой золы-уноса на коррозионную стойкость гидротехнических бетонов Рогунской ГЭС // Строительные материалы. 2017. № 9. С. 20–24.

[7] Лушникова В.Ю., Тамразян А.Г. Влияние коррозии арматуры на сцепление между арматурой и бетоном // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 4(80). С. 128–13 7. doi: 10.18720/MCE.80.12.

[8] Ходаков А.Е., Точёный М.В., Беляева С.В., Никонова О.Г., Пакрастиньш Л. Особенности применения российских и европейских стандартов в области ремонта и защиты бетонных конструкций от коррозии // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 3(30). С. 129–142.

[9] Клюев С.В., Клюев А.В., Абакаров А.Д., Шорстова Е.С., Гафарова Н.Е. Влияние дисперсного армирования на прочностные и деформативые характеристики мелкозернистого бетона // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 7(75). С. 66–75. doi: 10.18720/MCE.75.6.

[10] Сафаров К.Б., Степанова В.Ф. Регулирование реакционной способности заполнителей и повышение сульфатостойкости бетонов путем совместного применения низкокальциевой золы-уноса и высокоактивного метакаолина // Строительные материалы. 2016. № 5. С. 70–74.

[11] Нго Суан Хунг, Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А. Определение деформации образцов из мелкозернистого бетона на основе сульфатостойкого портландцемента // Вестник МГСУ. 2018. Т. 13. Вып. 12. С. 1499–1508. URL: https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.12.1499-1508

[12] Paul J.T., David E.B. Synthesis guide to best practices for corrosion resistant concrete. 2008, 87 p.

[13] Chiara F.F., Paul E.S., Kenneth A.S. Sulfate Resistance of Concrete: A New Approach. Published by PCA in 2006. 93 p.

[14] Нго Суан Хунг, Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А., Ха Хоа Ки, Мельникова А.И. Влияние золы рисовой шелухи на свойства гидротехнических бетонов // Научно-технический журнал по строительству и архитектуре «Вестник МГСУ», 2018. Т. 13. Вып. 6(117). С. 768–777. URL: https://doi.org/10.22227/1997–0935.2018.6.768-777

[15] Torii K., Taniguchi K., Kawamura M. Sulfate resistance of high fly ash content concrete. Cem. Concr. Res. 1995. No. 25. Pp. 759–68. URL: https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00066-L

[16] Si-Huy Ngo, Trong-Phuoc Huynh, Thanh-Tam Thi Le, Ngoc-

[Urban planning aspects of the sustainable development of large cities]. 2009. No. 93. Pp. 537–541. (rus)

[2] Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Yuri Bazhenov. Effect of rice husk ash on hydrotechnical concrete behavior // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018, 365, 032007. URL: https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032007.

[3] Zafirovski Z., Papikj J., Peshevski I. Analiz ustoychivosti otdel'nykh blokov vo vremya razrabotki gornogo massiva dlya gidrotekhnicheskogo ob»yekta [Stability analysis of individual blocks during excavation of the Rock Massif for a hydrotechnical facility]. Construction unique buildings and structures. 2015. No 5. Pp. 141–149. (rus)

[4] Mehta K.P. Concrete in the marine environment. Publisher of Taylor & Francis Books, 2003. 216 p.

[5] Tang Van Lam, Ngo Xuan Hung, Vu Kim Dien, Nguyen Trong Chuc, Bulgakov B.I., Bazhenova O.Yu., Galtseva N.A. Vliyaniye vodo-vyazhushchego otnosheniya i kompleksnoy organo-mineral'noy dobavki na svoystva betona, prigodnogo dlya stroitel'stva morskikh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy [Effect of complex organo-mineral additive on the properties of concrete in the construction of marine and hydrotechnical constructions]. Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo [Industrial and Civil Construction]. 2019. No. 3. Pp. 11–21. URL: https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.03.11-21 (rus)

[6] Safarov K.B., Stepanova V.F., Falikman V.R. Vliyaniye mekhanoaktivirovannoy nizkokal'tsiyevoy zoly-unosa na korrozionnuyu stoykost' gidrotekhnicheskikh betonov Rogunskoy GES [Effect of mechanically activated low-calcium fly ash on the corrosion resistance of hydraulic concretes of Rogun HPP]. Stroitel'nyye materialy [Construction Materials]. 2017. No. 9. Pp. 20–24. (rus)

[7] Lushnikova V.Y., Tamrazyan A.G. The effect of reinforcement corrosion on the adhesion between reinforcement and concrete. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 4(80). Pp. 128–137. doi: 10.18720/MCE.80.12. (rus)

[8] Khodakov A.E., Tochenyy M.V., Belyaeva S.V., Nikonova O.G., Pakrastinsh L. Osobennosti primeneniya rossiyskikh i yevropeyskikh standartov v oblasti remonta i zashchity betonnykh konstruktsiy ot korrozii [Features of using the Russian State Standards and the Eurocodes for the protection and repair of concrete structures]. Construction unique buildings and structures. 2015. No 3. Pp. 129–142. (rus).

[9] Klyuev S.V., Klyuev A.V., Abakarov A.D., Shorstova E.S., Gafarova N.G. The effect of particulate reinforcement on strength and deformation characteristics of fine-grained concrete. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 7(75). Pp. 66–75. doi: 10.18720/MCE.75.6. (rus)

[10] Safarov K.B., Stepanova V.F. Regulirovaniye reaktsionnoy sposobnosti zapolniteley i povysheniye sul'fatostoykosti betonov putem sovmestnogo primeneniya nizkokal'tsiyevoy zoly-unosa i vysokoaktivnogo metakaolina [Regulation reactivity of aggregates and increase sulphate concretes by joint application of low-calcium fly ash and highly active metakaolin]. Stroitel'nyye materialy [Building Materials]. 2016. No. 5. Pp. 70–74. (rus)

[11] Ngo Xuan Hung, Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A. Opredeleniye deformatsii obraztsov iz melkozernistogo betona na osnove sul'fatostoykogo portlandtsementa [Definition of deformation of fine-grained concrete on the basis of sulphate-resistant Portland cement]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018. Vol. 13. Is. 12. Pp. 1499–1508. URL: https://doi.org/10.22227/1997-0935.2018.12.1499-1508 (rus)

[12] Paul J.T., David E.B. Synthesis guide to best practices for corrosion resistant concrete, 2008. 87 p.

[13] Chiara F.F., Paul E.S., Kenneth A.S. Sulfate Resistance of Concrete: A New Approach. Published by PCA in 2006. 93 p.

[14] Ngo Xuan Hung, Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A., Ha Hoa Ky, Melnikov A.I. Vliyaniye zoly risovoy shelukhi na svoystva gidrotekhnicheskikh betonov [Effect of rice

Hang Thi Mai. Effect of high loss on ignition-fly ash on properties of concrete fully immersed in sulfate solution. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 371. 012007. doi: 10.1088/1757-899X/371/1/012007.

[17] Базанов С.М. Исследование влияния системы эттрингит – таумасит на свойства и коррозионную стойкость бетонов: дис. … канд. техн. наук. Иваново, 2002. 127 с.

[18] Ферронская А.В. Долговечность конструкций из бетона и железобетона. М.: Изд. АСВ, 2006. 335 с.

[19] Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В., Ларсен О.А. Нго Суан Хунг, Нгуен Дык Винь Куанг. Определение деформации мелкозернистого бетона в жидкой сульфатной среде // Журнал «Промышленное и гражданское строительство». 2017. № 8. С. 82–86.

[20] Сиротюк В.В., Лунёв А.А. Прочностные и деформационные характеристики золошлаковой смеси // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 6(74). С. 3–16. DOI: 10.18720/MCE.74.1.

[21] Sahmaran M., Kasap O., Duru K., Yaman I.O. Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. Cem. Concr. Compos. 2007. No. 29. Pp. 159–167. URL: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.007.

[22] Chindaprasirt P., Kanchanda P., Sathonsaowaphak A., Cao H.T. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. 2007 Constr. Build. Mater. 2007. No. 21. Pp. 1356–1361. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.10.005.

[23] Sumer M. Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing class F and class C fly ashes // Constr. Build. Mater. 2012. No. 34. Pp. 531–536. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.023

[24] Irassar E.F., Maio A.D., Batic O.R. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. Cem. Concr. Res. 1996. No. 26. Pp. 113–123. URL: https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00195-6

[25] ACI 211.4R-2008. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, 2010. 13 p.

[26] Танг Ван Лам, Булгаков Б.И., Александрова О.В. Математическое моделирование влияния сырьевых компонентов на прочность высококачественного мелкозернистого бетона при сжатии // Вестник МГСУ. 2017. Т. 12. Вып. 9 (108). С. 999–1009. URL: https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009

[27] Tuyen Minh Nguyen. Planning of the experiment. Publisher of Science and Technology. Hanoi, 2007. 264 p.

[28] Астахова Л.Г. Лекции по дисциплине «Математическая теория планирования эксперимента» // Владикавказ, 2013, 96 с.

[29] Бабин А.В., Ракипов Д.Ф. Организация и математическое планирование эксперимента. Екатеринбург, 2014. 113 с.

[30] ACI 318R-05. Building code requirements for structural concrete and commentary. Reported by ACI Committee 318. 2005. 432 p.

[31] ГОСТ 12730.5–84 Бетоны. Методы определения водонепроницаемости (с Изменением N 1). М.: Стандартинформ, 2007. 12 с.

[32] ГОСТ Р 56687–2015. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Метод определения сульфатостойкости бетона. М.: Стандартинформ, 2015. 8 с.

[33] Барабанщиков Ю.Г., Беляева С.В., Архипов И.Е., Антонова М.В., Школьникова А.А., Лебедева К.С. Влияние суперпластификаторов на свойства бетонной смеси // Инженерно-строительный журнал. 2017. № 6(74). С. 140–146. doi: 10.18720/MCE.74.11.

[34] Yoshitake I., Komure H., Nassif A.Y., Fukumoto S. Tensile properties of high volume fly-ash (HVFA) concrete with limestone aggregate // husk ash on the properties of hydraulic concretes]// Nauchno-tekhnicheskiy zhurnal po stroitel'stvu i arkhitekture «Vestnik MGSU» [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2018. Vol. 13. Is. 6(117). Pp. 768–777. URL: https://doi.org/10.22227/1997–0935.2018.6.768-777 (rus)

[15] Torii K., Taniguchi K., Kawamura M. Sulfate resistance of high fly ash content concrete. Cem. Concr. Res. 1995. No. 25. Pp. 759–68. URL: https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00066-L

[16] Si-Huy Ngo, Trong-Phuoc Huynh, Thanh-Tam Thi Le, Ngoc-Hang Thi Mai. Effect of high loss on ignition-fly ash on properties of concrete fully immersed in sulfate solution. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. 371. 012007. doi: 10.1088/1757-899X/371/1/012007.

[17] Bazanov S.M. Issledovaniye vliyaniya sistemy ettringit – taumasit na svoystva i korrozionnuyu stoykost' betonov [Study of the influence of the system ettringit – thaumasite on the properties and corrosion resistance of concrete]: dis. … cand. tech. Sciences. Ivanovo, 2002. 127 p. (rus)

[18] Ferronskaya A.V. Dolgovechnost' konstruktsiy iz betona i zhelezobetona [Durability of structures made of concrete and reinforced concrete]. M.: Publisher of ACB, 2006. 335 p. (rus)

[19] Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Aleksandrova O.V., Larsen O.A. Ngo Xuan Hung, Nguyen Duc Vinh Quang. Opredeleniye deformatsii melkozernistogo betona v zhidkoy sul'fatnoy srede [Determination of the deformation of fine-grained concrete in a liquid sulfate medium]. Zhurnal «Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo» [Journal of Industrial and Civil Engineering]. 2017. No. 8. Pp. 82–86. (rus)

[20] Sirotyuk V.V., Lunev A.A. Strength and deformation characteristics of ash and slag mixture. Magazine of Engineering. 2017. No. 6(74). Pp. 3–16. DOI: 10.18720/MCE.74.1.

[21] Sahmaran M., Kasap O., Duru K., Yaman I.O. Effects of mix composition and water-cement ratio on the sulfate resistance of blended cements. Cem. Concr. Compos. 2007. No. 29. Pp. 159–167. URL: https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.11.007.

[22] Chindaprasirt P., Kanchanda P., Sathonsaowaphak A., Cao H.T. Sulfate resistance of blended cements containing fly ash and rice husk ash. 2007 Constr. Build. Mater. 2007. No. 21. Pp. 1356–1361. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.10.005.

[23] Sumer M. Compressive strength and sulfate resistance properties of concretes containing class F and class C fly ashes. Constr. Build. Mater. 2012. No. 34. Pp. 531–536. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.02.023

[24] Irassar E.F., Maio A.D., Batic O.R. Sulfate attack on concrete with mineral admixtures. Cem. Concr. Res. 1996. No. 26. Pp. 113–123. URL: https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00195-6

[25] ACI 211.4R-2008. Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash, 2010. 13 p.

[26] Tang Van Lam, Bulgakov B.I., Alexandrova O.V. Matematicheskoye modelirovaniye vliyaniya syr'yevykh komponentov na prochnost' vysokokachestvennogo melkozernistogo betona pri szhatii [Mathematical modeling of the impact of raw material composition on compressive strength of High-performance fine-grained concrete]. Vestnik MGSU [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2017, vol. 9 (108), Pp. 999–1009. URL: https://doi.org/10.22227/1997-0935.2017.9.999-1009 (rus)

[27] Tuyen Minh Nguyen. Planning of the experiment. Publisher of Science and Technology. Hanoi, 2007. 264 p.

[28] Astakhova L.G. Lektsii po distsipline «Matematicheskaya teoriya planirovaniya eksperimenta» [Lectures on the subject «The mathematical theory of experiment planning»]. Vladikavkaz, 2013, 96 p. (rus)

[29] Babin A.V., Rakipov D.F. Organizatsiya i matematicheskoye planirovaniye eksperimenta [Organization and mathematical planning of the experiment]. Ekaterinburg, 2014. 113 p. (rus)

[30] ACI 318R-05. Building code requirements for structural concrete

Construction and Building Materials. 2013. No. 49. Pp. 101–109. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.020.

[35] Рассохин А.С., Пономарев А.Н., Фиговский О.Л. Микрокремнеземы различных типов для высокопрочных мелкозернистых бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2018. № 2(78). С. 151–160. doi: 10.18720/MCE.78.12.

[36] Tang Van Lam, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Oksana Larsen and Pham Ngoc Anh, Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of High-performance concrete, E3S Web of Conferences 33, 02030 (2018). URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302030.

[37] Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Sofia Bazhenova, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Tho Dinh Vu. Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on the workability of concrete mixture in the High-Rise Construction // E3S Web of Conferences 33, 02029 (2018). URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302029

[38] Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. М.: Изд. Наука, 1983, 416 с.

and commentary. Reported by ACI Committee 318. 2005. 432 p.

[31] GOST 12730.5–84 Betony. Metody opredeleniya vodonepronitsayemosti (s Izmeneniyem N 1) [Concretes. Methods for determining the water resistance]. M.: Standartinform, 2007. 12 p. (rus)

[32] GOST R 56687–2015. Zashchita betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktsiy ot korrozii. Metod opredeleniya sul'fatostoykosti betona [Protection of concrete and reinforced concrete structures from corrosion. Method for the determination of sulphate resistance of concrete]. M.: Standartinform, 2015. 8 p. (rus)

[33] Barabanshchikov Yu.G., Belyaeva S.V., Arkhipov I.E., Antonova M.V., Shkol'nikova A.A., Lebedeva K.S. Influence of superplasticizers on the concrete mix properties. Magazine of Civil Engineering. 2017. No. 6(74). Pp. 140–146. doi: 10.18720/MCE.74.11. (rus)

[34] Yoshitake I., Komure H., Nassif A.Y., Fukumoto S. Tensile properties of high volume fly-ash (HVFA) concrete with limestone aggregate. Construction and Building Materials. 2013. No. 49. Pp. 101–109. URL: https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.020.

[35] Rassokhin A.S., Ponomarev A.N., Figovsky O.L. Silica fumes of different types for high-performance fine-grained concrete. Magazine of Civil Engineering. 2018. No. 2(78). Pp. 151–160. doi: 10.18720/MCE.78.12. (rus)

[36] Tang Van Lam, Boris Bulgakov, Olga Aleksandrova, Oksana Larsen and Pham Ngoc Anh, Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of High-performance concrete, E3S Web of Conferences 33, 02030 (2018). URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302030

[37] Lam Van Tang, Boris Bulgakov, Sofia Bazhenova, Olga Aleksandrova, Anh Ngoc Pham, Tho Dinh Vu. Effect of Rice Husk Ash and Fly Ash on the workability of concrete mixture in the High-Rise Construction. E3S Web of Conferences 33, 02029 (2018). URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183302029

[38] Bol'shev L.N., Smirnov N.V. Tablitsy matematicheskoy statistiki [Tables of mathematical statistics]. M.: Nauka 1983. 416 p. (rus)

Контактная информация

1.* +7(905)7581983, lamvantang@gmail.com (Лам Танг Ван, аспирант)

2. +7(966)19060, xuanhung1610@gmail.com (Нго Суан Хунг, аспирант)

3. 79685164689, kimdienxdtb@gmail.com (Зиен Ву Ким, аспирант)

4. +79104537985, fakultetst@mail.ru (Булгаков Борис Игоревич, к.т.н., доцент)

Contact information

1.* +7(905)7581983, lamvantang@gmail.com (Lam Tang, M.Sc.)

2. +7(966)19060, xuanhung1610@gmail.com (Xuan Hung Ngo, PhD)

3. 79685164689, kimdienxdtb@gmail.com (Vu Kim Dien, M.Sc.)

4. +79104537985, fakultetst@mail.ru (Bulgakov Boris, Candidate of Engineering Sciences)

© Лам Танг Ван, Нго Суан Хунг, Зиен Ву Ким, Булгаков Б.И., 2019