

УДК 691.327

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВА РЕАКЦИОННО-ПОРОШКОВОГО БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО ЗОЛУ-УНОСА В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ

ПРОЕКТУВАННЯ СКЛАДУ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВОГО БЕТОНУ, ЩО МІСТИТЬ ЗОЛУ-ВИНОСУ В ЯКОСТІ АКТИВНОЇ МІНЕРАЛЬНОЇ ДОБАВКИ

REACTIVE POWDER CONCRETE WITH FLY ASH AS ACTIVE MINERAL ADMIX COMPOSITION DESIGN

Житковский В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Дворкин Л.И., д.т.н., профессор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Степасюк Ю.А., к.т.н., ст. преподаватель, Механчук В.М., студент, Паничевний В.В., студент (Национальный университет водного хозяйства и природопользования, г. Ровно)

Житковський В.В., к.т.н., доцент, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, Степасюк Ю.О., к.т.н., ст. викладач, Механчук В.М., студент, Панічевний В.В., студент (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Zhytkovskyy V.V, candidate of technical sciences, senior lecturer, Dvorkin L.J., doctor of technical sciences, professor, Stepasyuk Y.O., candidate of technical sciences, senior teacher, Panichevny V.V., student, Mehhanchuk V. M., student (National University of Water Management Environmental Engineering, Rivne)

В статье приведенные результаты исследования реактивно-порошковых бетонов, в которых в качестве активной минеральной добавки использована зола-уноса ТЭС. По результатам исследований было построено номограммы, которые, в совокупности с комплексом полученных моделей, могут быть использованы для проектирования складов РПБ с комплексом заданных свойств.

У статті наведені результати дослідження реактивних порошкових бетонів, в яких в якості активної мінеральної добавки використано золу виносу ТЕС. За результатами досліджень побудовано номограми, які, в сукупності з комплексом отриманих моделей, можуть бути використані для проектування складів РПБ з комплексом заданих властивостей.

The article presents the results of a study the reactive powder concrete, in which fly ash as active mineral additives were used. The cost of which is significantly lower than the cost of silica fume and metakaolin as the main components of such concrete. As a result of the analysis of the complex obtained experimental data, it was found that the fly ash of thermal power plants is the effective active mineral additive for the manufacture of reaction powder concrete. Due to the fact that the bulk of the ash is represented by particles of a spherical shape, when it is introduced into the composition of concrete, some plasticizing effect is observed which leads to a decrease in W/C and a corresponding increase in strength. Based on the obtained experimental-statistical models, the water demand and strength nomograms of reactive powder concretes constructed using fly ash as an active mineral additives were constructed. These nomograms, together with the complex of the obtained models, can be used to design compositions of reactive powder concrete with a given strength and mobility.

Ключевые слова: реакционно-порошковый бетон, зола уноса, активная минеральная добавка, прочность, суперпластификатор, математическая модель

реакційно-порошковий бетон, зола виносу, активна мінеральна добавка, міцність, суперпластифікатор, математична модель

reactive powder concrete, fly ash, active mineral additive, strength, superplasticizer, mathematic model

Введение. Реакционно-порошковые бетоны – РПБ (Reactive Powder Concrete) относятся к бетонам нового поколения, отличительными особенностями которых являются высокие физико-механические свойства, в том числе повышенное соотношение прочности на растяжение при изгибе к прочности на сжатие [1, 2]. На комплекс свойств РПБ влияет наряду с низким водо-вяжущим отношением высокий расход вяжущего, в состав которого входит кроме портландцемента значительное (до 80% массы цемента) количество активных минеральных компонентов, ведущее место среди которых занимает обычно микрокремнезем [3, 4]. Вместе с тем микрокремнезем, как стабильный технический продукт, изготавливается в ограниченном количестве, его транспортирование, хранение и дозирование сопряжены с определенной сложностью, обусловленные низкой насыпной плотностью и ультравысокой дисперсностью [5]. В связи с этим практический интерес представляют РПБ с использованием таких распространенных дисперсных технических продуктов как зола-унос.

Результаты исследований. В статье анализируются экспериментально-статистические модели основных свойств золосодержащих РПБ и предлагается методика проектирования их составов.

В качестве основных исходных материалов для проведения экспериментальных исследований использовали портландцемент ПЦ-I М500

ВАТ Волынь-Цемент, г. Здолбунов и золу-унос Бурштынской ТЭЦ (Ивано-Франковская обл.). Их состав и свойства приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Химический состав золы-уноса и
химико-минералогический состав цемента

Химический состав, %	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Содержание несгоревших частиц
Портландцемент	64,5	20,3	5,3	4,1	0,74	-
Зола-унос*	3,24	56,8	24,4	12,5	0,35	1,6
Минералогический состав цемента, %	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₃ AF	CaO _c	R ₂ O
	66,95	13,15	7,42	12,48	-	

* Удельная поверхность золы-унос – 310 м²/кг

Таблица 2

Физико-механические свойства портландцемента

Свойство	Значение	Свойство	Значение
Удельная поверхность, м ² /кг	360	Предел прочности на сжатие, МПа:	
Нормальная плотность, %	26,5	2 сут	18,0-25,0
Сроки схватывания:			
начало, мин	90...150	28 сут	50,0-55,0
конец, ч	4,5...5	Предел прочности при изгибе, МПа:	
		1 сут	3,2-4,2
		28 сут	6,0-6,8

Таблица 3

Условия планирования эксперимента

№	Факторы		Уровни варьирования			Интервал
	Код. вид	Натуральный вид	-1	0	+1	
1	X ₁	Расход цемента, кг/м ³	720	840	960	120
2	X ₂	Н/Ц	0,2	0,3	0,4	0,1
3	X ₃	Расход суперпластификатора Dynamon SP-3, %	1	1,5	2	0,5

*Н/Ц – отношение расхода золы к расходу цемента по массе.

Основные исследования были выполнены с применением математического планирования эксперимента. Для этого был реализован трехуровневый трехфакторный план В₃ [6]. Условия планирования экспериментальных исследований приведены в табл. 3.

Выходные параметры

Водопотребность бетона, л/м ³	$V=234,7+23X_1+10,1X_2-10,1X_3+0,2X_1^2+1,7X_2^2-7,3X_3^2+1,5X_1X_2-1,5X_1X_3$ (1)
Водоцементное отношение	$V/C=0,28-0,012X_1-0,012X_2-0,012X_3+0,002X_1^2+0,002X_2^2-0,008X_3^2$ (2)
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 1 сут, МПа	$R_{зг}^1=7,94+0,722X_1-0,19X_2+0,5X_3+0,065X_1^2-0,318X_2^2-0,205X_3^2-0,1X_1X_2-0,113X_2X_3$ (3)
Прочность при сжатии в возрасте 1сут, МПа	$R_{сж}^1=35,28+3,82X_1-1,3X_2+1,72X_3-2,2X_1^2-3,03X_2^2-1,23X_3^2-0,075X_1X_3-0,05X_2X_3$ (4)
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 7сут, МПа	$R_{зг}^7=14,38+0,455X_1-0,66X_2+0,611X_3+0,292X_1^2-1,06X_2^2-0,338X_3^2+0,01X_1X_2-0,015X_1X_3+0,045X_2X_3$ (5)
Прочность при сжатии в возрасте 7сут, МПа	$R_{сж}^7=64,55+4,38X_1-1,32X_2+2,92X_3+1,48X_1^2-2,12X_2^2-2X_3^2+3,5X_1X_3+0,95X_2X_3$ (6)
Прочность на растяжение при изгибе в возрасте 28 сут, МПа	$R_{зг}^{28}=23,21+0,55X_1-0,25X_2+0,14X_3+0,4X_1^2-0,6X_2^2-0,13X_3^2+0,4X_2X_3$ (7)
Прочность при сжатии в возрасте 28 сут, МПа	$R_{сж}^{28}=112,9+3,1X_1-0,7X_2+5,5X_3-1X_1^2-5,3X_2^2-3,5X_3^2+0,2X_1X_2+0,4X_1X_3+0,4X_2X_3$ (8)

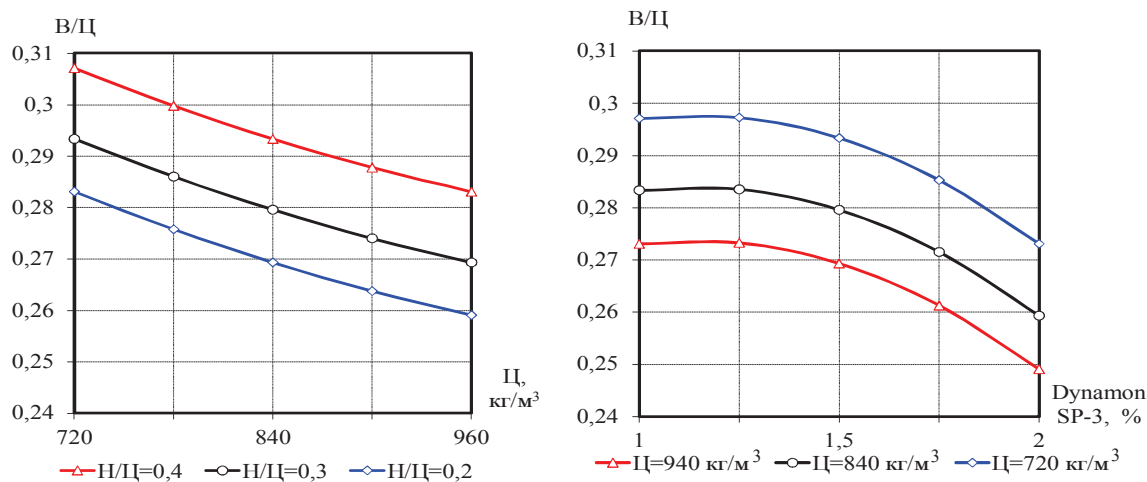


Рис. 1. Влияние на водопотребность РПБ (В/Ц) с применением золы уноса ТЭС, содержания цемента (Ц) и добавки Dynamon SP-3.

В качестве заполнителя при изготовлении РПБ был использован кварцевый песок фракции 0,16...1,25 мм. Для максимального уменьшения водопотребности и соответствующего повышения прочности РПБ, в их состав вводилась добавка суперпластификатора полиакрилатного типа Dynamon SP-3 (Marec, Италия), содержание которой изменялось в диапазоне 1...2% от массы вяжущего. Расход воды в каждой точке плана определялся из

условия обеспеченности заданного расплыва конуса 25...30 см на вискозиметре Суттарда.

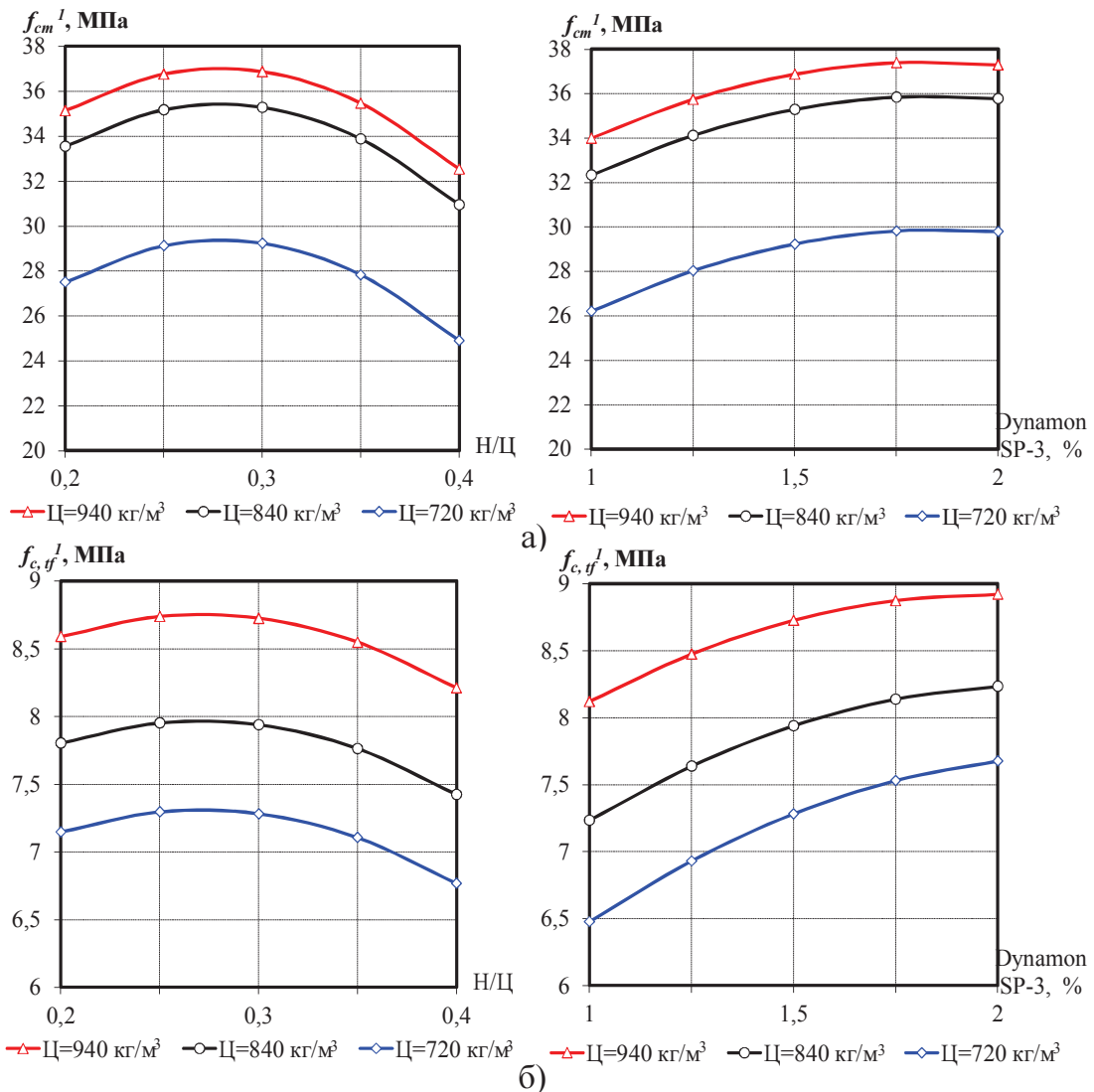


Рис. 2. Влияние технологических факторов на прочность при сжатии (а) и при изгибе (б) РПБ в возрасте одни сутки (Н/Ц – отношение массы зольного наполнителя к массе цемента).

После проведения обработки и статистического анализа экспериментальных данных получены математические модели водоцементного отношения, и прочности РПБ на сжатие и изгиб в возрасте 1, 7 и 28 суток в виде полиномиальных уравнений регрессии (табл.4).

Графические зависимости, иллюстрирующие влияние технологических факторов на водоцементное отношение и прочность бетона на сжатие и изгиб в возрасте 1 и 28 суток нормального твердения приведены на рис.1, 2, 3, 4.

Исследования показали, что уменьшение водоцементного отношения РПБ вызывает увеличение расхода цемента и расхода пластифицирующей добавки. При использовании золы уноса ТЭС в качестве активного минерального наполнителя РПБ, во всех точках плана наблюдается снижение

В/Ц в среднем на 5...7%. Это объясняется сферической формой стекловидных частиц золы.

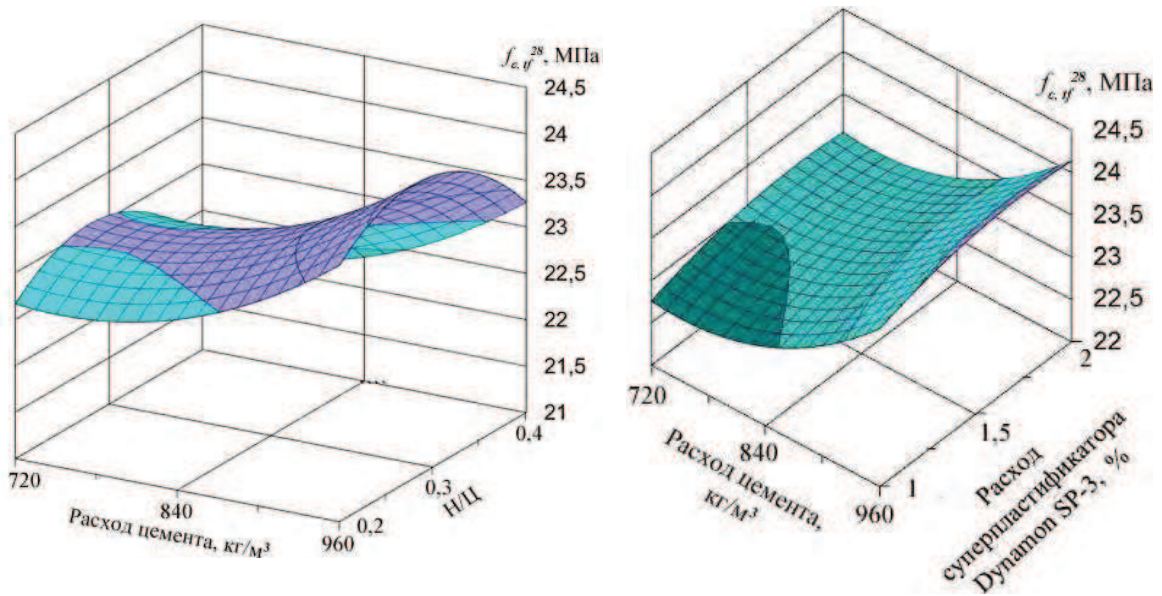


Рис. 3. Влияние технологических факторов на прочность при изгибе РПБ в возрасте 28 суток

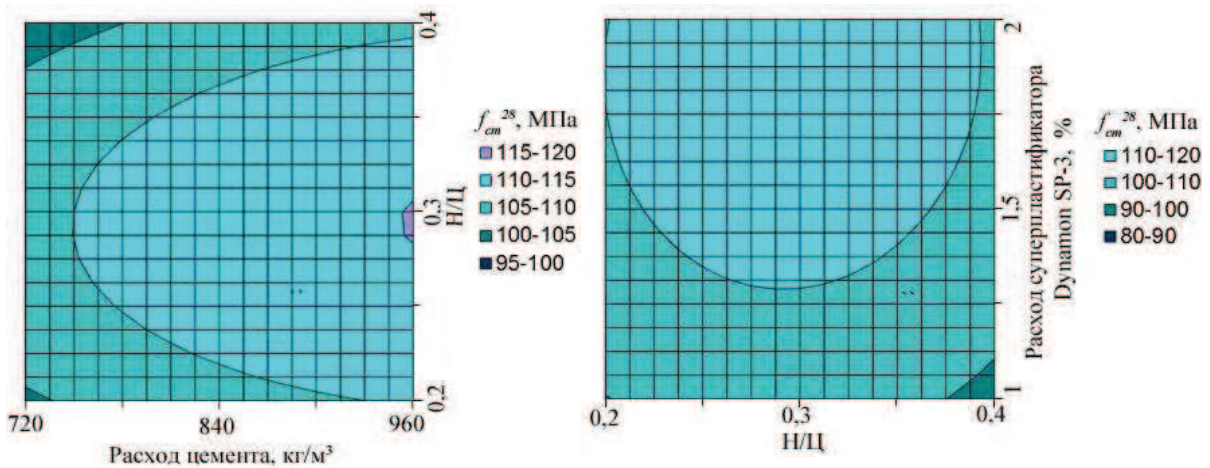


Рис. 4. Влияние технологических факторов на прочность при сжатии РПБ в возрасте 28 суток

Характер влияния варьируемых факторов на прочностные характеристики РПБ, как следует из анализа комплекса полученных экспериментально-статистических моделей и построенных на их основе графических зависимостей, существенно не изменяется при увеличении продолжительности твердения бетона. Существенное увеличение прочности бетона как на сжатие, так и на растяжение при изгибе вызывает увеличение расхода цемента и добавки суперпластификатора Дунамон SP-3, что главным образом связано с резким снижением водоцементного отношения и соответствующим увеличением плотности образцов. Также к некоторому росту прочности приводит увеличение количества активного минерального наполнителя в диапазоне от 20 до 30% от массы вяжущего. Дальнейшее

увеличение его количества приводит к резкому снижению прочности, что вызвано уменьшением количества активной клинкерной составляющей в общей массе вяжущего. Влияние данного фактора на прочностные характеристики РПБ носит экстремальный характер.

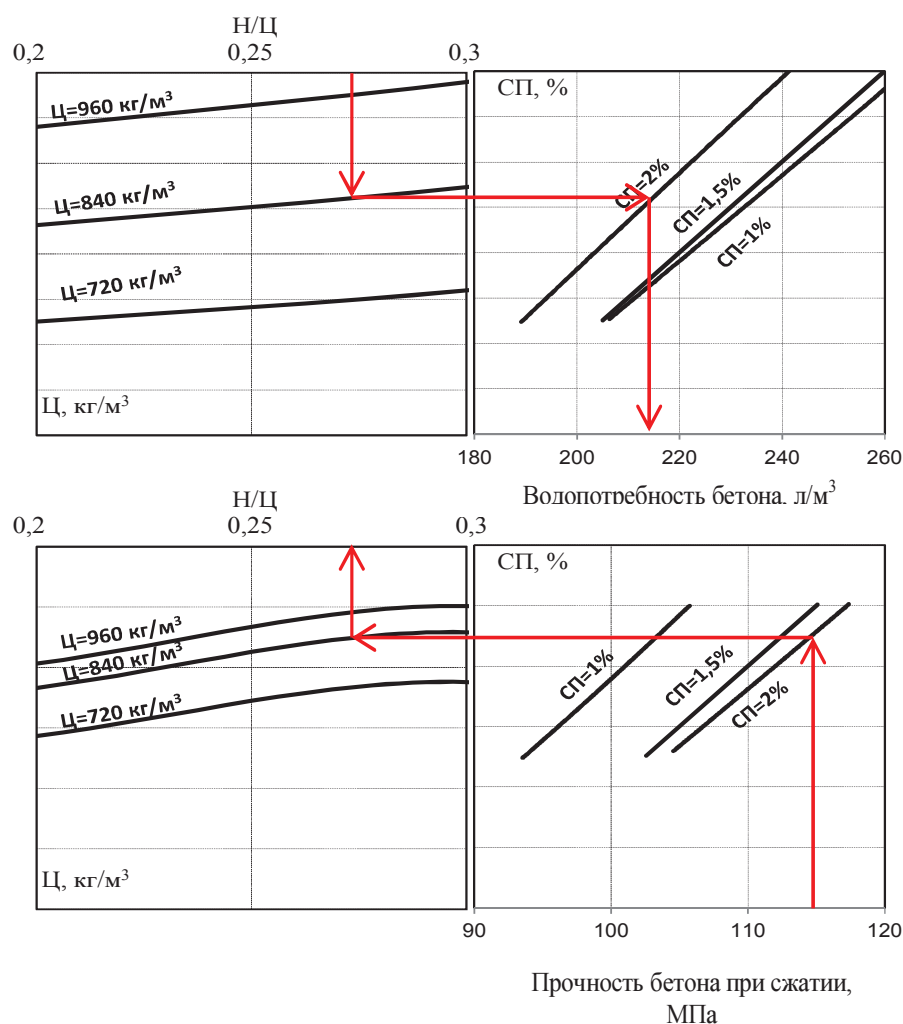


Рис. 5. Номограмма водопотребности и прочности при сжатии РПБ, изготовленных с использованием золы уноса ТЭС

В результате анализа комплекса полученных экспериментальных данных было установлено, что зола уноса ТЭС является эффективным активным минеральным наполнителем для изготовления реакционно-порошковых бетонов. Вследствие того, что основная масса золы представлена частицами сферической формы, при введении ее в состав бетона наблюдается некоторый пластифицирующий эффект который приводит к снижению В/Ц и соответствующего увеличения прочности. При этом максимальная прочность при сжатии 115,2 МПа и при изгибе 24,1 МПа РПБ наблюдается при следующем соотношении варьируемых факторов: расход цемента на максимальном уровне – 960 кг/м³, соотношение между количеством наполнителя (золы уноса ТЭС) и количеством цемента в среднем уровне – 0,3; расход суперпластификатора Dynamon SP-3 на максимальном уровне – 2% от массы вяжущего.

На основе полученных экспериментально-статистических моделей (1,8) (табл.4) построены номограммы водопотребности и прочности реактивно порошковых бетонов, изготовленных с применением в качестве активного минерального наполнителя золы уноса ТЭС. Данные номограммы в совокупности с комплексом полученных моделей (табл.4), могут быть использованы для проектирования составов реакционно-порошковых бетонов с заданной прочностью и подвижностью. При этом методика расчета заключается в следующем:

1. Используя номограмму прочности при сжатии приведенную на рис. 5. поочередно определяем расход суперпластификатора Dypamon SP-3, расход цемента и содержание наполнителя, которые будут обеспечивать заданную прочность РПБ на сжатие в возрасте 28 суток.

2. Используя номограмму водопотребности приведенную на рис. 5 и при предварительно определенных расходе суперпластификатора, цемента и наполнителя, устанавливаем расход воды которая будет обеспечивать получение бетонной смеси с подвижностью 25...30 см по вискозиметру Суттарда.

3. Расход заполнителей можно рассчитать, зная объем цементного теста ($V_{ц.т}$) в бетонной смеси.

Объем цементного теста, л/м³:

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_ц} + \frac{Н}{\rho_н} + B. \quad (9)$$

Объем песка, л/м³:

$$V_n = 1000 - V_{ц.т}. \quad (10)$$

Масса песка $П$, кг/м³ :

$$П = \rho_n V_n. \quad (11)$$

В приведенных выше формулах $\rho_ц$, $\rho_н$, ρ_n – истинная плотность соответственно цемента ($\rho_ц \approx 3,1$ кг/л), наполнителя и песка.

Пример расчета.

Рассчитать состав РПБ, изготовленного с применением в качестве активного минерального наполнителя золы уноса ТЭС, с 28-суточной прочностью на сжатие 115 МПа и подвижностью 25 ... 30 см по вискозиметру Суттарда. В качестве пластифицирующей добавки используется суперпластификатор Dypamon SP-3. Истинная плотность цемента $\rho_ц=3,1$ г/см³, истинная плотность золы уноса ТЭС $\rho_н=2,8$ г/см³, истинная плотность песка $\rho_n=2,65$ г/см³.

1. Используя номограмму прочности при сжатии приведенную на рис.5, графическим методом устанавливаем, что для обеспечения заданной прочности при сжатии 115 МПа минимально возможный расход цемента составит – 840 кг/м³, содержание наполнителя – 27,5% от массы цемента, расход суперпластификатора Dypamon SP-3 – 2% от массы вяжущего.

2. Используя номограмму водопотребности, приведенную на рис.5, устанавливаем, что при таком компонентном составе бетона минимально возможное количество воды, при которой будет обеспечена заданная подвижность бетонной смеси 25...30 см по вискозиметру Сутгарда будет составлять – 215 л/м³.

3. Расход заполнителей рассчитываем, зная объем цементного теста ($V_{ц.т}$) в бетонной смеси.

Объем цементного теста, л/м³:

$$V_{ц.т} = \frac{Ц}{\rho_{ц}} + \frac{Н}{\rho_{н}} + В = \frac{840}{3,1} + \frac{231}{2,8} + 215 = 568,5 \text{ л/м}^3$$

Объем песка, л/м³:

$$V_n = 1000 - V_{ц.т} = 1000 - 568,5 = 431,5 \text{ л/м}^3$$

Масса песка П, кг/м³ :

$$П = \rho_n V_n = 2,65 * 431,5 = 1143 \text{ кг/м}^3$$

Полученный по расчетам бетон имеет следующий состав: цемент – 840 кг/м³, зола уноса ТЕС – 231 кг/м³, вода – 215 л/м³, песок фракции 0,16...1,25 – 1143 кг/м³. Расход суперпластификатора Dynamon SP-3 составляет 2% от массы вяжущего.

Таким образом, исследования показали возможность изготовления реакционно-порошковых бетонов, в которых в качестве активной минеральной добавки использована зола-унос стоимость которой существенно ниже, чем стоимость обычно применяемых для РПБ микрокремнезема или метакаолина. По результатам исследований получен комплекс математических моделей, на основе которых предложена методика проектирования составов бетона.

1. Kwan, A.H.K. (2003), "Development of High Performance Concrete for Hong Kong", Materials Science and Technology in Engineering Conference.

2. Aarsleff, L., Bredal-Joregensen, J. and Poulsen, E. (1985), "On the properties of ultra high strength concrete with particular reference to heat of hydration", Very High Strength Cement-Based Materials, Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol. 42, pp. 19-29.

3. Cyr, M.F. and Shah, S.P. (2002), "Advances in concrete technology", Advances in Building Technology, Vol. 1, pp. 17-27.

4. Young, J.F. (1991), "Macro-Defect-Free Cement: A Review", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., Vol. 179, pp. 101-121.

5. Flaga, K. (2000), "Advances in materials applied in civil engineering", Journals of Materials Processing Technology, Vol. 106, pp. 173-183.

6. Дворкін Л.І. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Л.І. Дворкін, О.Л. Дворкін, В.В. Житковський // - Рівне: НУВГП, 2011- 174 с.

Dvorkin L.I. Rozv'язuvannia budivelno-tekhnologichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, V.V. Zhytkovskyi // - Rivne: NUVHP, 2011- 174 s.