

Марко Ольга Юрьевна, магистр техн. наук, ассистент, ГУВПО «Белорусско-Российский университет» (г. Могилев, Беларусь)

Ливинская Виктория Александровна, канд. физ.-мат. наук, доцент, ГУВПО «Белорусско-Российский университет» (г. Могилев, Беларусь)

Корбут Елена Евгеньевна, канд. техн. наук, доцент, ГУВПО «Белорусско-Российский университет» (г. Могилев, Беларусь)

БЕТОННЫЕ СМЕСИ И БЕТОН С ДОБАВКОЙ «УКД-1» – ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЙ СВОЙСТВ

© РУП «Институт БелНИИС», 2019
Institute BelNIIS RUE, 2019

АННОТАЦИЯ

В материале статьи изложены результаты исследований влияния отечественной комплексной химической добавки («УКД-1»), содержащей структурированный углеродный наноматериал (УНМ) и характеризующейся совмещенным (ускоряющим твердение и пластифицирующим) эффектом, на изменения во времени формуемости бетонных смесей и на кинетику твердения бетона в беспрогревном варианте технологии монолитного бетонирования. Целью исследований являлось установление закономерностей изменения формуемости (осадки конуса) подвижных бетонных смесей с добавкой «УКД-1» во времени в зависимости от изменяющихся факторов – свойств цемента, температуры, условий транспортирования – для разработки соответствующих рекомендаций по использованию этой новой добавки в монолитном бетоне. При выполнении экспериментальных исследований использовали стандартизированные методы испытаний. В результате установлено, что влияние добавки «УКД-1» на сохранение формовочных свойств бетонных смесей подчиняется общим закономерностям, характерным для входящих в ее состав пластифицирующего и ускоряющих твердение бетона веществ, и определена

допускаемая продолжительность транспортирования смесей с этой добавкой в диапазоне температуры от 0...5 оС до 25...30 оС, что обеспечивает необходимые условия для ведения бетонных работ. С использованием стандартизированных и оригинальных методик экспериментально выявлены закономерности роста прочности тяжелого цементного бетона под влиянием отдельно взятого ускоряющего компонента добавки «УКД-1» и этой добавки в зависимости от ее дозировки (в диапазоне 0,5...2,0 % от массы цемента). Экспериментально оценены зависимости темпа роста бетона с добавкой «УКД-1» от основных технологических факторов – качества цемента, величины водоцементного отношения, состава бетона и консистенции бетонной смеси, температуры среды твердения и теплоизолирующих характеристик форм-опалубок. Это позволило обосновать рациональные режимы и параметры условий твердения бетона с добавкой «УКД-1» для обеспечения прочности (на сжатие) в диапазоне 50...100 % от требуемой в проектном возрасте (28 сут.) без затрат энергии на ускорение его твердения.

Ключевые слова: комплексная химическая добавка, сульфат натрия, суперпластификатор, углеродный наноматериал, цемент, бетон, формуемость, ускорение твердения, технология монолитного бетонирования.

Для цитирования: Марко, О. Ю. Бетонные смеси и бетон с добавкой «УКД-1» – оценка изменений свойств / О. Ю. Марко, В. А. Ливинская, Е. Е. Корбут // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2019. – Вып. 11. – С. 164–188. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-11>

Olga Marko, Master in Engineering Science, Assistant, Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus)

Viktoriya Livinskaya, PhD in Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Belarusian-Russian University (Mogilev, Belarus)

CONCRETE MIXTURES AND CONCRETE WITH THE ADDITION OF «UKD-1» – EVALUATION OF CHANGES IN PROPERTIES

ABSTRACT

The results of researches of influence of domestic complex chemical additive («UKD-1»), containing the structured carbon nanomaterial (CNM) characterized by the combined (the accelerating curing and plasticizer) effect on the time variation of the formability of concrete mixtures and on kinetics of curing of concrete in technology of monolithic concreting technology without warming up are expounded in the article. The aim of this study was to establish patterns of change in formability (slump) of flowable concrete mixtures with the addition of «UKD-1» in time depending on the varying factors: the properties of the cement, the temperature conditions of transportation, and to develop appropriate recommendations for the use of this new additive in monolith concrete. In carrying out experimental studies using standardized test methods. As a result, found that the influence of the additive «UKD-1» for the preservation of the molding properties of concrete mixtures follows the general laws specific to its constituent plasticizing and accelerating the hardening of concrete materials, and defined the permissible duration of transportation with these additive mixtures in the temperature range from 0...5 °C to 25...30 °C, that provides the necessary conditions for year-round maintenance of concrete work. Standardized and original methods has revealed the regularities of growth of the strength of heavy cement concrete under the influence of the separately taken accelerating component of the additive «UKD-1» and this additive, depending on the dosage (in the range (0,5...2,0) % of the mass of cement)). The dependence of the growth rate of concrete with the additive of «UKD-1» from the basic technological factors – quality of cement, the values of water-cement ratio, concrete composition and consistency of the concrete mix, ambient temperature curing and heat-insulating characteristics form formwork experimentally evaluated. This proved the rational

modes and parameters of the conditions of concrete hardening with the addition of «UKD-1» for strength (compression) in the range of (50...100) % of the required project in the aged (28 days), without cost of energy to accelerate its hardening.

Keywords: complex chemical additive, sodium sulfate, carbon nanomaterial, cement, concrete, formability, hardening acceleration, monolithic concreting technology.

For citation: Marko O., Livinskaya V., Korbut E. Concrete mixtures and concrete with the addition of «UKD-1» – evaluation of changes in properties. *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 11. 2019. pp. 164–188. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-11> (in Russian)

ВВЕДЕНИЕ

В связи с огромным масштабом современного строительства укладка бетона в сооружения осуществляется круглогодично. При зимнем строительстве к твердению бетона предъявляются два основных требования: бетон должен достигать распалубочной прочности в оптимальные сроки и подвергаться первым воздействиям отрицательных температур лишь после достижения устойчивости к замораживанию [1].

При повышенном темпе строительства монолитных зданий (особенно высотных) бетон обогревают, начиная с сентября месяца и заканчивая в апреле, т. к. в этом случае быстро нарастающая нагрузка на бетон ранее возведенных этажей (несущих конструкций) требует ускоренного роста его прочности (вплоть до проектной). Традиционные технологии бетонирования с разными вариантами прогрева бетона характеризуются значительной продолжительностью твердения бетона до набора требуемой прочности и большими затратами энергии, достигающими 150...200 кВт•ч на 1 м³ бетона [2–4]. В связи с этим в настоящих исследованиях поставлена задача ускорения темпа роста прочности бетона в беспрогревном варианте технологии монолитного бетонирования и снижения энергетических затрат при прогревах бетона.

Для регулирования свойств бетона, бетонной смеси и экономии цемента применяют различные добавки в бетон. Одним из технологических приемов является использование комплексных химических добавок в бетон, проявляющих эффект пластификации в сочетании с эффектом повышения темпа набора прочности, что обеспечивает ускорение оборота опалубок, а в итоге – повышение темпа, сокращение сроков строительства и энергетических затрат на его производство.

Приведенным критериям полностью отвечает новая химическая добавка «УКД-1», разработанная в Беларуси с использованием в составе отечественного углеродного наноматериала (УНМ) и обладающая эффективным сочетанием пластифицирующе-ускоряющего воздействия на цементный бетон. Комплексная добавка для бетона «УКД-1» – пластифицирующая добавка I группы, ускоряющая твердение, применяемая для приготовления бетонных смесей, предназначенных для изготовления бетонных и железобетонных изделий и конструкций, вяжущими для приготовления которых являются цементы на основе портландцементного клинкера.

В настоящей статье сделана попытка математической обработки накопленного экспериментального материала по влиянию добавки «УКД-1» на формовочные свойства бетонных смесей, а также на кинетику роста и уровень прочности бетона. В результате получены математические зависимости в виде уравнений регрессии, позволяющих прогнозировать изменения формуемости смеси во времени и прочности твердеющего бетона с добавкой «УКД-1» в зависимости от ее дозировки и других (основных) технологических факторов.

ИЗМЕНЕНИЕ ФОРМОВОЧНЫХ СВОЙСТВ СМЕСИ БЕТОНА ПРИ НОРМАЛЬНОЙ (20 ± 2 °С) ТЕМПЕРАТУРЕ

Оценивали снижение подвижности (ОК, см) или рост жесткости (Ж, с) по СТБ EN 12350-3-2012 [5] бетонных смесей без добавок и с добавками во времени при следующих изменяющихся факторах:

- начальной формуемости смеси и состава бетона;
- при использовании смеси с различной начальной температурой;
- при изменении температуры наружного воздуха;
- при статическом состоянии и с периодическим перемешиваем смеси.

В таблице 1 приведены исходные данные по составам и свойствам бетонных смесей и приготовленного из них бетона, которые использовались в исследованиях. Дозировка химических добавок (исследуемой «УКД-1» и принятой для сравнения – сульфата натрия (Na_2SO_4 , СН), который входит в комплекс «УКД-1» в качестве ускорителя твердения) принята соответствующей 1 % от массы цемента (МЦ) по сухому веществу как наиболее рациональная; для сульфата натрия – по рекомендациям источников [6, 7], а для «УКД-1» по собственным исследованиям автора, приведенным в источнике [8].

Таблица 1

Характеристики бетонных смесей и бетона

№ п/п	Класс бетона	Формуемость бетонной смеси		Марка цемента	Расход составляющих (кг) на 1 м ³ бетона:				Средняя плотность, кг/м ³	Водоцементное отношение бетона
		«Ж», с	«ОК», см		Ц	П	Шщ	В		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
А. Составы без добавок:										
1	C12/15	7...8	–	M400	245	760	1230	155	2390	0,63
2	C12/15	–	3...4	M400	275	765	1200	160	2400	0,58
3	C12/15	–	12...14	M400	380	685	1100	201	2365	0,53
4	C25/30	–	3...4	M500	385	620	1180	176	2350	0,46
5	C25/30	–	12...14	M500	465	590	1090	208	2350	0,45
Б. Составы с добавкой 1 % СН от МЦ										
6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
9	C25/30	–	3...4	M500	364	670	1185	161	2380	0,44
10	C25/30	–	12...14	M500	442	625	1100	195	2360	0,44

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
В. Составы с добавкой 1 % «УКД-1» от МЦ										
11	C12/15	7...8	–	M400	220	825	1240	122	2410	0,55
12	C12/15	–	3...4	M400	247	785	1250	130	2415	0,52
13	C12/15	–	12...14	M400	340	755	1150	163	2380	0,48
14	C12/15	–	21...23	M400	405	720	1065	180	2370	0,44
15	C25/30	–	12...14	M500	345	725	1175	145	2395	0,42
16	C25/30	–	21...23	M500	420	720	1065	175	2380	0,41
17	C32/40	–	12...14	M500	400	695	1150	156	2405	0,39

Во всех случаях в таблице 1 начальную (исходную) подвижность (жесткость) бетонных смесей определяли через 15 мин. после выгрузки их из смесителя (СТБ 1035-96 п. 5.2. [9]) и с интервалами, указанными в таблице 2.

В таблице 2 приведены данные об изменении формуемости бетонной смеси во времени в зависимости от состава бетона, начальной консистенции смеси, наличия и вида добавки («УКД-1» или СН – сульфат натрия). Температура смеси соответствовала ~15...18 °С и окружающей среды ~18...22 °С.

Таблица 2

Изменение формуемости бетонной смеси различных составов и консистенции

Номер состава бетона по таблице 1	Наличие и вид примененной добавки	Изменение формуемости бетонной смеси (осадки конуса (см) или жесткости (с) за период (в мин.) от момента приготовления:								
		15 (исходная)	30	45	60	75	90	105	120	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
1	– СН «УКД-1»	Ж, 7 с	9	11	14	15	20	30	42	
6		Ж, 5 с	6	10	16	25	30	50	–	
11		Ж, 6 с	6	8	11	14	21	35	50	
2	– СН «УКД-1»	ОК, 3 см	2,5	2	» 2	1,5	» 1	0,5	–	
7		ОК, 4 см	3,0	2	1,5	1,0	0,5	–	–	
12		ОК, 4 см	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5	
3	– СН «УКД-1»	ОК, 13 см	12	11	9,5	7,5	6	5,5	4,5	
8		ОК, 13 см	12	10,5	8,5	6	4,5	3,5	1,5	
13		ОК, 14 см	13	12	10,5	8	6,5	5	4	

Окончание таблицы 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4	– СН «УКД-1»	ОК, 3 см	3	2,5	2	1	0,5	–	–
9		ОК, 4 см	3	2,5	2	0,5	–	–	–
14		ОК, 21 см	18	15	11	8	6	4	2
5	– СН «УКД-1»	ОК, 12 см	11	10	8	6	4,5	4	3
10		ОК, 14 см	13	11	9	5	3,5	1,5	–
16		ОК, 22 см	20	16	10	6,5	4	2,5	0,5
17	«УКД-1»	ОК, 13 см	11	11	8	6	2,5	0,5	–

Кинетика формуемости может быть описана линейным уравнением регрессии вида:

$$y = a \cdot x + b, \quad (1)$$

где a – коэффициент наклона (угловой коэффициент), показывающий средний абсолютный прирост высоты конуса за 1 минуту;

b – свободный член уравнения.

Уравнения регрессии, описывающие изменение формуемости бетонной смеси составов №№ 2, 7, 12, 3, 8 и 13 и их сравнение, представлены в таблицах 3 и 4, где R^2 – коэффициент детерминации, служащий мерой качества зависимости [10].

Таблица 3

Уравнения регрессии, описывающие изменение формуемости бетонной смеси различных составов

Состав бетона и наличие добавки	Уравнение регрессии
1	2
Состав № 2 (без добавок)	$y = -0,0258x + 3,3357; R^2 = 0,9804$
Состав № 7 (1 % СН)	$y = -0,0457x + 4,4; R^2 = 0,9681$
Состав № 12 (1 % «УКД-1»)	$y = -0,0337x + 4,5179; R^2 = 0,9953$
Состав № 2 (без добавок)	$y = -0,0867x + 14,484; R^2 = 0,9838$
Состав № 7 (1 % СН)	$y = -0,1139x + 15,125; R^2 = 0,9907$
Состав № 12 (1 % «УКД-1»)	$y = -0,1024x + 16,036; R^2 = 0,9868$

**Сравнение моделей, описывающих влияние наличия добавок
на кинетику формуемости бетона**

Наименование параметров	Номер состава по таблице 1					
	№ 2	№ 7	№ 12	№ 3	№ 8	№ 13
1	2	3	4	5	6	7
Начальное значение, см	3	4	4	13	13	14
Конечное значение, см	0,5	0,5	0,5	4,5	1,5	4
Коэффициент уравнения	-0,0258	-0,0457	-0,0337	-0,0867	-0,1139	-0,1024
Период наблюдения, мин.	90	75	105	105	105	105
Дельта эмпирическое	-2,5	-3,5	-3,5	-8,5	-11,5	-10
Дельта по уравнению	-2,322	-3,4286	-3,5375	-9,1042	-11,9583	-10,75
Коэффициент детерминации R ²	0,9804	0,9681	0,9953	0,9838	0,9907	0,9868
Абсолютная погрешность, см	0,178	0,0714	0,0375	0,6042	0,4583	0,75
Относительная погрешность, %	7,1 %	2,0 %	1,1 %	7,1 %	4,0 %	7,5 %

Полученные на бетонных смесях данные полностью соответствуют ранее установленным закономерностям влияния этих добавок на сроки схватывания цемента [11].

Анализ изменения формуемости бетонных смесей разной подвижности (таблицы 3 и 4) показывает, что с ростом начальной величины осадки конуса пластичных бетонных смесей абсолютные значения снижения этого показателя за равный отрезок времени от момента приготовления смеси возрастают. Так, если низкопластичная смесь (без добавок и с ними, №№ 2, 7, 12) через 60 мин. от момента приготовления «теряет» 1...2,5 см осадки конуса, оставаясь в диапазоне марки «П1» (дельта эмпирическое составляет 2,5...3,5 см с относительной погрешностью до 7,1 %), то смеси исходной марки «П3» ($OK_{нач} \sim 13...14$ см; №№ 3, 8, 13, 17) «теряют» 3...5 см и переходят в марку «П2» (дельта эмпирическое составляет 8,5...11,5 см с относительной погрешностью до 7,5 %), а литая смесь (№№ 14, 16) через 60...75 мин. переходит в марку «П2» и теряет 13...15 см осадки конуса.

В целом отмеченное явление закономерно, так как в рассматриваемых случаях повышение начальной пластичности смеси бетона равной прочности сопровождалось несколько большим

приростом расхода цемента в сравнении с расходом воды и снижением водоцементного отношения бетона. При переходе к более высоким классам бетона эта тенденция нарастает. Она связана с необходимостью увеличения толщины «прослоек» цементного теста вокруг зерен заполнителей, что обеспечивает снижение напряжения сдвига (τ_0) бетонной смеси и рост подвижности. Этот эффект усиливается с введением в смесь с большим объемом цементного теста пластифицирующих добавок. Поэтому их эффективность выше в смесях с большим расходом цемента. Одновременно рост содержания цемента, понижение расхода воды и снижение В/Ц бетона способствуют проявлению эффекта ускорения потерь формуемости смесью, особенно если в бетон введена добавка, способствующая ускорению схватывания цемента.

Основываясь на полученных данных можно сделать вывод, что для диапазона температур бетонной смеси и среды порядка 15...22 °С введение добавки «УКД-1» в равноподвижные пластичные смеси бетона разных классов прочности не оказывает существенного влияния на изменение их формовочных свойств во времени, присущих смесям без химических добавок.

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ В ДИАПАЗОНЕ 5...30 °С НА ФОРМОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА СМЕСИ С ДОБАВКОЙ

Общие закономерности влияния изменений температуры на сохраняемость формовочных свойств бетонных смесей известны. Было необходимо оценить возможные изменения их под влиянием исследуемой добавки. В экспериментах принят диапазон температуры бетонной смеси тяжелого конструкционного бетона и воздушной среды от 5 °С до 30 °С, как наиболее характерный для климатической зоны Беларуси при круглогодичном ведении работ, включая требования к температуре смесей ТКП 45-5.03-21-2006 [12] для зимнего периода работ.

В таблице 5 приведены данные об изменении формуемости бетонной смеси составов (по таблице 1) №№ 2, 7, 12 (низкопластичная смесь) и №№ 5, 10, 13, 16, 17 (пластичная и литая (по СТБ 1035-96 [9])) под влиянием температуры наружного воздуха

($t_{нв}$). При этом температура бетонной смеси ($t_{см}$) соответствовала условию: $t_{см} = t_{нв}$, для температуры среды в 5...8 °С; 12...15 °С и 18...22 °С; при $t_{нв} = 25...30$ °С температура смеси начальная равнялась 18...20 °С.

Таблица 5

Влияние температуры окружающей среды и добавок на изменение формуемости бетонных смесей

Номер состава бетона по таблице 1	Наличие и вид примененной добавки	Изменение формуемости бетонной смеси (ОК, см) за период (в мин.) от момента приготовления:							
		15	30	45	60	75	90	105	120
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А. при $t_{нв} = 5...8$ °С									
2 7 12	– СН «УКД-1»	3,5	3	3	2,5	2	2	1,5	1
		4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5
		4	3,5	3	3	2,5	2,0	» 2	1,5
5 10 13 16	– СН «УКД-1» «УКД-1»	12	11,5	11	10	8	6,5	5,5	5
		13	12	11,5	10	8	5,5	4,5	2
		14	13,5	13,5	12	11	10	8	5
		22	21	18	15	12	9	6,5	4
17	«УКД-1»	13	13	12	11	11	9	3,5	2,5
Б. при $t_{нв} = 12...15$ °С									
2 7 12	– СН «УКД-1»	3,5	3	2,5	2	1,5	1,5	1	0,5
		4	3,5	3	2,5	1,5	1,0	0,5	–
		4	3,5	3	» 3	2,5	2	1,5	1
5 10 13 16	– СН «УКД-1» «УКД-1»	12	11	» 11	10	8,5	6,5	5	4
		13	12,5	10,5	9,5	7	3	1	–
		14	13	12,5	11	10	8,5	7,5	4,5
		22	21	17,5	13,5	9,5	7	4,5	2
17	«УКД-1»	14	13	12	10	9	7	5	3
В. при $t_{нв} = 18...22$ °С									
2 7 12	– СН «УКД-1»	3	2,5	2	1,5	1	» 1	0,5	–
		4	3,5	3	2	1,5	0,5	–	–
		4	3,5	3	2,5	2	1,5	1	0,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	– СН «УКД-1» «УКД-1»	12	11	10	8	6	4,5	4	3
10		14	13	11	9	5	3,5	1,5	–
13		14	13	12	10,5	8	6,5	5	4
16		22	20	16	10	6,5	4	2,5	0,5
17	«УКД-1»	13	11	11	8	6	2,5	0,5	–
Г. при $t_{\text{нв}} = 25...30 \text{ } ^\circ\text{C}$									
2	– СН «УКД-1»	3	2	~ 2	1,5	~ 1	0,5	–	–
7		4	3	~ 2	1,0	0,5	–	–	–
12		4	3	2,5	2	1,5	1	0,5	–
5	– СН «УКД-1» «УКД-1»	12	10,5	9,5	6,5	3	1,5	–	–
10		14	11,5	8	4,5	1	–	–	–
13		14	12,5	11,5	10	7	5	1,5	–
16		22	20	14,5	8,5	4	1,5	–	–
17	«УКД-1»	14	12	10,5	8,5	5,5	3	0,5	–

Линейные уравнения регрессии по формуле (1), описывающие изменение формуемости бетонной смеси составов №№ 5 и 13 под влиянием температуры окружающей среды, и их сравнение представлены в таблицах 6 и 7.

Таблица 6

Уравнения регрессии, описывающие изменение формуемости бетонной смеси под влиянием температуры

Состав бетона, наличие добавки и температура окружающей среды	Уравнение регрессии
1	2
состав № 5 (без добавок), $t = 5...8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$y = -0,075x + 13,75;$ $R^2 = 0,967$
состав № 13 (1 % «УКД-1»), $t = 5...8 \text{ } ^\circ\text{C}$	$y = -0,081x + 16,339;$ $R^2 = 0,9057$
состав № 5 (без добавок), $t = 12...15 \text{ } ^\circ\text{C}$	$y = -0,0802x + 13,911;$ $R^2 = 0,9562$
состав № 13 (1 % «УКД-1»), $t = 12...15 \text{ } ^\circ\text{C}$	$y = -0,0849x + 15,857;$ $R^2 = 0,9615$
состав № 5 (без добавок), $t = 18...22 \text{ } ^\circ\text{C}$	$y = -0,0925x + 13,554;$ $R^2 = 0,9796$
состав № 13 (1 % «УКД-1»), $t = 18...22 \text{ } ^\circ\text{C}$	$y = -0,1024x + 16,036;$ $R^2 = 0,9868$

Сравнение моделей, описывающих влияние температуры окружающей среды на кинетику формуемости бетона

Наименование параметров	Номер состава по таблице 1 и температура наружного воздуха и смеси, °С					
	№ 5 t=6	№ 13, t=6	№ 5 t=13	№ 13 t=13	№ 5, t=20	№ 13, t=20
1	2	3	4	5	6	7
Начальное значение, см	12	14	12	14	12	14
Конечное значение, см	5	5	4	4,5	3	4
Коэффициент уравнения	-0,0715	-0,081	-0,0802	-0,0849	-0,0925	-0,1024
Период наблюдения, мин	105,00	105	105	105	105	105
Дельта эмпирическое	-7	-9	-8	-9,5	-9	-10
Дельта по уравнению	-7,5075	-8,5	-8,4167	-8,9167	-9,71	-10,75
Коэффициент детерминации R ²	0,967	0,9057	0,9562	0,9615	0,9796	0,9868
Абсолютная погрешность, см	0,5075	0,5	0,4167	0,5833	0,7083	0,75
Относительная погрешность, %	7,2%	5,6%	5,2%	6,1%	7,9%	7,5%

Данные таблицы 5 подтверждают прямую зависимость ухудшения формуемости бетонной смеси и с добавками, и без них с повышением температуры смеси и окружающей среды. Если сравнить динамику изменения формуемости низкопластичной смеси (П1, составы №№ 2, 7 и 12), пластичной (П3, №№ 5, 10 и 13) и литой (П5, состав № 16), то с ростом температуры с более высоким темпом она снижается для литой смеси, затем пластичной. Так, для составов №№ 5 и 13 при температуре наружного воздуха 18...22 °С угловые коэффициенты уравнений регрессии наибольшие по модулю и составляют -0,0925 и -0,1024 соответственно (таблицы 6 и 7). Низкопластичная смесь характеризуется относительно низким темпом потерь формуемости в диапазоне температур 5...30 °С. Это связано с большим водоцементным отношением бетона (В/Ц) и, соответственно, относительным содержанием цементного теста:

$$X = (B/C)_{\text{цт}} \cdot K_{\text{нг}}, \quad (2)$$

где $(B/C)_{\text{цт}}$ – водоцементное отношение цементного теста (без учета количества воды, связанной поверхностью и порами заполнителей, которое в наших экспериментах равнялось 40...45 л на 1 м³ бетона);

$K_{\text{нг}}$ – коэффициент нормальной густоты цемента, равный 0,265 для М400 (составы бетона №№ 2, 7, 12) и 0,26 для М500 (составы №№ 5, 10, 13, 16).

Обобщая данные таблицы 5, приходим к выводу, что с введением в бетон комплексной добавки 1 % «УКД-1» от МЦ период сохраняемости формовочных свойств зависит от температуры смеси и окружающей среды и составляет для низкопластичных смесей период до 120...90 мин. при температуре 5...30 °С соответственно (по критерию снижения осадки конуса не ниже 1 см); для пластичных бетонных смесей с добавкой 1 % «УКД-1» (состав № 13) период их сохранности соответствует до 90 мин. для $t_{\text{нв}} \sim 5...8$ °С, до 75 мин. для $t_{\text{нв}} \sim 12...15$ °С, до 60 мин. для $t_{\text{нв}} \sim 20...30$ °С. Сохраняемость свойств литой бетонной смеси, полученной с применением добавки «УКД-1», в пределах марки П5 сохраняется до 30 мин. при $t_{\text{нв}} \sim 5...15$ °С и 15...20 мин. при $t_{\text{нв}} \sim 20...30$ °С.

КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА С ДОБАВКОЙ В НОРМАЛЬНО-ВЛАЖНОСТНЫХ УСЛОВИЯХ

В таблице 8 приведены результаты экспериментов, отражающих зависимость кинетики твердения (роста прочности на сжатие) бетона из равноподвижных смесей (ОК ~ 3...4 см) с различным количеством добавки «УКД-1» и рекомендуемым для железобетона расходом наиболее широко применяемого в отрасли ускорителя твердения 1 % Na₂SO₄ массы цемента, взятым для сравнения [6, 7, 13]. Даны средние значения относительной (в % от проектной прочности бетона без добавок) прочности в серии (не менее 3 образцов), приведенной с поправочным коэффициентом вариации 0,95 по ГОСТ 10180-90 [14]; внутрисерийный коэффициент вариации не превышал 7...8 %.

**Влияние добавки «УКД-1» на кинетику твердения бетона
в нормально-влажностных условиях**

Вид и количество добавки в % от МЦ	Прочность бетона в % от проектной в возрасте, сут.					Прочность на сжатие в 28 сут.	
	1	2	3	4	7	МПа	%
1	2	3	4	5	6	7	8
Без добавок	26	43	53	60	71	38,5	100
СН; 1 %	42	66	78	82	91	40,8	106
«УКД-1»; 0,5 %	42	67	79,5	84	93	43,1	112
«УКД-1»; 0,75 %	44	71	83	91	100,5	45,4	118
«УКД-1»; 1,0 %	48	77	92	100	110	48,5	126
«УКД-1»; 1,5 %	49	78	94	104	111	49,7	129
«УКД-1»; 2,0 %	50	80	95	106	113	50,0	130

Влияние различного содержания добавки «УКД-1» на кинетику твердения бетона при нормально-влажностных условиях оценивалось методами прикладной статистики с помощью программы Statistica-7 (модуль Nonparametrics) [15].

Выдвигалась нулевая гипотеза об отсутствии различий в кинетике бетонной смеси без добавок, с добавкой СН (1 %) и с добавкой «УКД-1» различной концентрации. Прочность измерялась в течение 1, 2, 3, 4 и 7 суток на 6 опытных образцах. Для малых выборок данная гипотеза проверяется с помощью непараметрических ранговых критериев Kruskal-Wallis и медианного теста (таблица 9).

Таблица 9

**Результаты проверки гипотезы об отсутствии влияния добавки
«УКД-1» для анализируемых видов бетона (критерий Kruskal-
Wallis, Median Test)**

Сутки	H (6, N=42); p-level	Chi-Square(6); p-level
1	2	3
1-е сутки	29,24695; p = 0,0001	21,33333; p = 0,0016
2-е сутки	31,65670; p = 0,0000	22,66667; p = 0,0009
3-и сутки	30,95903; p = 0,0000	26,66667; p = 0,0002
4-е сутки	35,03212; p = 0,0000	33,33333; p = 0,0000
7-е сутки	34,30786; p = 0,0000	33,33333; p = 0,0000

В таблице 9 представлены значения критерия Н (для теста Kruskal-Wallis), критерия Chi-Square для медианного теста и уровень р, по которому делается вывод о возможности принятия гипотезы при выбранном уровне значимости. Для всех временных промежутков выполняется неравенство $p < 0,05$, что свидетельствует о статистически значимых различиях в прочности на всех этапах наблюдения у различных бетонных смесей в нормально-влажностных условиях.

Графическая иллюстрация результатов приведена на рисунке 1.

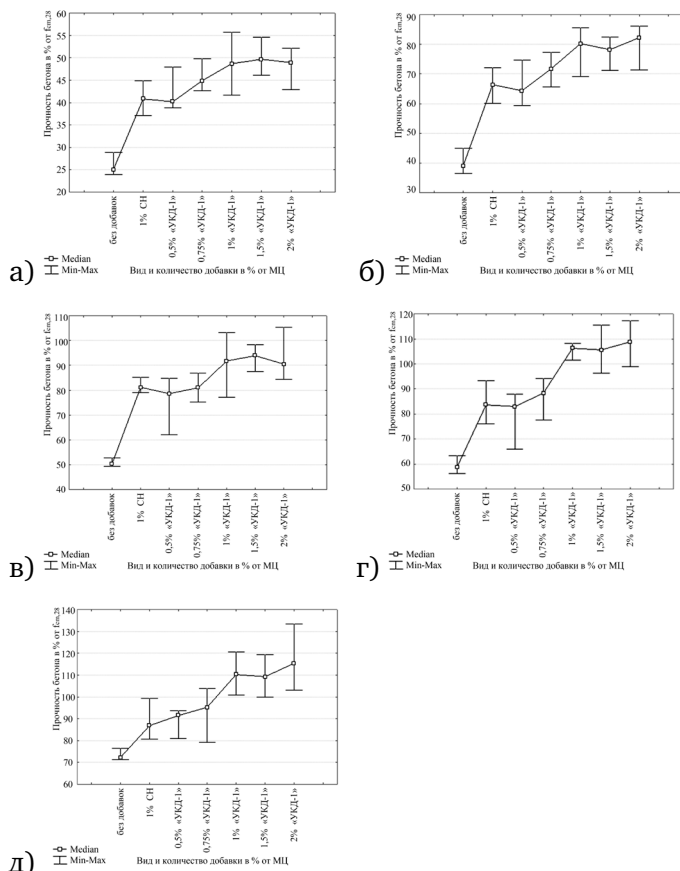


Рисунок 1. Влияние различного содержания добавки «УКД-1» на кинетику твердения бетона при нормально-влажностных условиях: а) 1 сутки твердения, б) 2 сутки твердения; в) 3 сутки твердения; г) 4 сутки твердения; д) 7 сутки твердения

Наибольшая прочность наблюдается при 2 % уровня «УКД-1», однако бетонные смеси с процентным содержанием 1 %, 1,5 % и 2 % различаются незначительно, что подтверждается результатами тестов, представленными в таблице 10.

Таблица 10

Результаты проверки гипотезы об отсутствии влияния добавки «УКД-1» для бетона с добавками в количестве 1 %, 1,5 %, 2 % (критерий Kruskal-Wallis, медианный тест)

Сутки	H (2, N=18); p-level	Chi-Square (2); p-level
1	2	3
1-е сутки	0,3625731; p = 0,8342	0,000000; p = 1,000
2-е сутки	1,555556; p = 0,4594	1,333333; p = 0,5134
3-и сутки	0,4210526; p = 0,8102	1,333333; p = 0,5134
4-е сутки	0,1520468; p = 0,9268	0,000000; p = 1,000
7-е сутки	1,976608; p = 0,3722	1,333333; p = 0,5134

Для всех временных промежутков выполняется неравенство $p > 0,05$, что свидетельствует о статистически незначимых различиях в прочности на всех этапах наблюдения у бетонных смесей с процентным содержанием добавки «УКД-1» 1 %, 1,5 % и 2 % при твердении бетона в нормально-влажностных условиях.

Зависимость прочности бетона от процентного содержания добавки и возраста бетонной смеси может быть описана уравнением множественной линейной регрессии, объясняющим 82 % вариации результативного признака:

$$Y = 40,17 + 8,41 \cdot S + 11,39 \cdot R, R^2 = 0,82, \quad (3)$$

где Y – прочность бетона в % от проектной;

S – возраст, сутки;

R – удельный вес добавки УКД-1, %.

Уравнение является статистически значимым: положительные значения коэффициентов при переменных указывает на

прямую связь между факторами. Увеличение на 1 % концентрации добавки «УКД-1» увеличивает прочность бетона на 11,39 % от проектной ($f_{cm,28}$).

КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА В УСЛОВИЯХ «ТЕРМОСА»

Важнейшей задачей настоящего этапа следований было установление зависимости кинетики роста прочности бетона с добавкой «УКД-1» от его саморазогрева за счет аккумуляции теплоты экзотермии цемента. Известно, что минералы портландцементного клинкера в процессе реакции гидролиза-гидратации выделяют значительное количество теплоты. Ее аккумуляция (путем гидро-, теплоизоляции твердеющего бетона) способствует росту его температуры, что сопровождается интенсификацией реакций цемента с водой и нарастанием его тепловыделения в 1...3 сутки твердения. Этот эффект возрастает с введением в реагирующую систему «цемент-вода» добавок, ускоряющих твердение бетона [13, 16–18].

Таким образом, основной эффективной беспрогревной технологии цементного бетона является максимально возможное использование экзотермии вяжущего при организации твердения бетона по методу термоса.

На начальном этапе экспериментов установили кинетику роста прочности бетона с 1 % от МЦ добавки «УКД-1» и изменение его температуры в процессе твердения в условиях гидро-, теплоизоляции. Для этого поверхность форм герметизировали полиэтиленовой пленкой и устанавливали в пенополистерольный ящик на период твердения. В геометрический центр одного из средних (в трехгнездных формах) образцов устанавливали датчик-термопару для контроля за изменениями температуры. Начальную температуру бетона приняли в диапазоне: 5...8 °С; 12...15 °С и 18...22 °С, как наиболее характерном для весенне-осеннего периода ведения работ в Беларуси. В качестве примера использовали составы бетона класса $C^{12}/_{15}$ (ОК ~ 12...14 см) № 1 (без добавки) и № 13 (1 % «УКД-1»). Периодически контролируя изменения температуры и прочность твердеющего бетона, получили данные, приведенные в таблице 11 и на рисунке 4 (представлены частично).

**Кинетика изменения температуры и прочности бетона
при твердении в условиях термоса**

Порядковый номер состава по таблице 1	Группа эф- фективности цемента М400	Температура бетона в °С к исходу суток				Прочность бетона в % от 28-суточной через сутки		
		0*	1	2	3	1	2	3
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А. Состав без добавок								
1	I	20	25	30	33	37	58	64
1	II	20	23	28	30	35	55	62
1	III	20	23	25	28	29	51	56
Б. Состав с добавкой «УКД-1»								
13	I	6	9	17	24	32	50	65
13	I	13	18	28	33	41	58	74
13	I	20	28	37	42	54	79	96
13	II	6	8	14	21	27	46	63
13	II	13	15	25	29	36	51	70
13	II	20	25	33	38	51	74	89
13	III	6	8	12	16	21	44	53
13	III	13	15	22	24	32	52	62
13	III	20	21	28	31	35	56	72

* Начальная температура свежееотформованного бетона

Изменение температуры с течением суток можно описать линейной зависимостью, оценка которой представлена в таблице 12 (столбец 2). Коэффициент детерминации (близкий к единице) во всех случаях подтверждает качество модели. Сравнение угловых коэффициентов в уравнениях прямых для бетонной смеси без добавок и с 1 % добавкой «УКД-1» при одинаковой начальной температуре подтверждает тот факт, что с течением каждых суток температура в смеси с добавкой выше на 2,7 градуса [19].

Изменение прочности в зависимости от времени твердения описывается логарифмической зависимостью, оценка которой дана в таблице 12 (столбец 3).

Сравнение коэффициентов при $\ln(x)$ подтверждает, что прочность растет быстрее у смеси с добавкой, чем без нее, при одинаковой начальной температуре.

Уравнения регрессии, описывающие изменение температуры бетонной смеси и прочности при твердении в условиях термоса

Наличие добавки и начальная температура бетонной смеси	Кинетика температуры	Кинетика прочности
1	2	3
Без добавок, $t_{нач} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$y = 3,5x + 20; R^2 = 0,9761$	$y = 25,037\ln(x) + 35,713; R^2 = 0,9854$
1 % «УКД-1», $t_{нач} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$	$y = 5,1x + 4,6; R^2 = 0,951$	$y = 32,192\ln(x) + 26,107; R^2 = 0,9861$
1 % «УКД-1», $t_{нач} = 13\text{ }^{\circ}\text{C}$	$y = 5,8x + 11,8; R^2 = 0,9397$	$y = 29,946\ln(x) + 34,448; R^2 = 0,9533$
1 % «УКД-1», $t_{нач} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$	$y = 6,2x + 19,7; R^2 = 0,9907$	$y = 34,438\ln(x) + 50,765; R^2 = 0,9992$

Из результатов эксперимента следует, что сведение к минимуму потерь тепла экзотермии цемента позволяет даже при низкой положительной начальной температуре бетонной смеси создать в твердеющем бетоне с добавкой благоприятный температурный режим, а при начальной температуре смеси не ниже 13...15 °С обеспечить температуру в бетоне более 20 °С, то есть фактически нормальный режим твердения.

Из полученных экспериментальных данных о кинетике роста прочности бетона с добавкой 1 % «УКД-1» следует, что ее уровень $\geq 50\%$ от прочности проектного возраста (т. е. обеспечивающей расчетный класс бетона) достигается через 24 ч. естественного твердения в условиях гидро-, теплоизоляции при использовании цемента I и II групп эффективности при пропаривании; прочность бетона $\geq 70\%$ в тех же условиях твердения достигается к 40...48 ч. для бетона, приготовленного на вяжущем III группы эффективности. Время твердения до $f_{cm} \geq 50\%$ и $f_{cm} \geq 70\%$ от $f_{cm,28}$ составляет не менее 48 ч. и 3...4 суток соответственно.

Очевидно, что реализация эффективной беспрогревной технологии (даже при использовании утепленных опалубок и создании термосных условий твердения бетона) возможна при применении активных вяжущих. При этом предпочтительны цементы I группы эффективности с допущением цементов II группы эффективности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Экспериментально установлены закономерности изменения подвижности пластичных бетонных смесей марок «П1», «П3» и «П5» (литая смесь) конструкционного тяжелого бетона классов $C^{12}/_{15}$ до $C^{32}/_{40}$ в диапазоне температур смеси 5...28 °С и температур наружного воздуха 5...30 °С. Определено, что с введением добавки «УКД-1» в оптимальной дозировке (~ 1 % от массы цемента) период сохранения формовочных свойств низкопластичных смесей составляет до 120...90 мин. при $t_{нв(см)} \sim 5...30$ °С, пластичных – до 90...75 мин. при $t_{нв(см)} \sim 5...30$ °С, для литых – до 30 мин. при $t_{нв} \leq 30$ °С, что необходимо учитывать при практическом использовании этой добавки.

2. Выявлено, что в нормальных условиях твердения прочность бетона с 1 % «УКД-1», в сравнении с бетоном без добавок из равноподвижных смесей марки «П1» составляет в 1 сутки 45...50 % от проектной (~ 25 % без добавок), достигает 70...80 % через 2 суток и ≥ 90 % через 3 суток (без добавок ~ 45 % и 55 % соответственно), чем обеспечиваются необходимые и достаточные предпосылки для реализации эффективной беспрогревной технологии бетонирования.

3. Выполнена математическая обработка результатов исследований по изменению формуемости бетонных смесей во времени и кинетики роста прочности бетона, результатом которой являются уравнения регрессии, адекватно отражающие и позволяющие прогнозировать эти изменения под влиянием вещества добавки «УКД-1» и основных технологических факторов – температуры и условий ведения работ и твердения бетона.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. КХД1-2007. Химические добавки для бетонов и строительных растворов. Каталог. – Минск : Минстройархитектуры РБ, 2007. – 57 с.
2. Лысов, В. П. Эффективность бетонных работ в строительстве / В. П. Лысов. – Минск : Беларусь, 1982. – 92 с.

3. Арбеньев, А. С. Зимнее бетонирование с электроподогревом смеси / А. С. Арбеньев. – М. : Стройиздат, 1970. – 103 с.
4. Бессер, Я. Р. Методы зимнего бетонирования / Я. Р. Бессер. – М. : Стройиздат, 1976. – 168 с.
5. Методы испытаний бетонной смеси. Часть 3. Метод Вебе : СТБ EN 12350-3-2012. – Введ. 01.01.13. – Минск : Стройтехнорм, 2013. – 12 с.
6. Применение добавок в бетон : ПП-99 к СНиП 3.09.01-85. – Введ. 01.07.2000. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь, 2000. – 36 с.
7. Батыновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батыновский, Е. И. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. – 2006. – № 3. – С. 7-17.
8. Шейда, О. Ю. Технологические свойства бетонных смесей для энергосберегающей технологии монолитного бетона / О. Ю. Шейда, Е. Е. Корбут, Э. И. Батыновский // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2012. – № 2. – С. 153-164.
9. Бетоны конструкционные тяжелые. Технические условия : СТБ 1544-2005. – Введ. 01.07.05. – Минск : Стройтехнорм, 2005. – 36 с.
10. Саймон, Д. Анализ данных в Excel – наглядный курс создания отчетов, диаграмм и сводных таблиц / Д. Саймон. – М. : Диалектика, 2004. – 528 с.
11. Шейда, О. Ю. Влияние комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал, на свойства цемента / О. Ю. Шейда, Э. И. Батыновский // Наука и техника. – 2015. – № 2. – С. 30-38.
12. Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства : ТКП 45-5.03-21-2006. – Введ. 01.07.06. – Минск : Стройтехнорм, 2006. – 107 с.
13. Батыновский, Э. И. Технологические особенности производства ЖБК с применением ускорителей твердения бетона / Э. И. Батыновский, Р. Ф. Осос // Проблемы технологии производства строительных материалов,

- изделий и конструкций, строительство зданий и сооружений: сб. ст. / Бел. политехн. ин-т ; под ред. Н. П. Блещика, Э. И. Батыновского. – Брест, 1998. – Вып. 1. – С. 22-25.
14. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам : ГОСТ 10180-90. – Введ. 01.01.91. – М. : НИИЖБ РФ, 1998. – 45 с.
 15. Боровиков, В. П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на STATISTICA / В. П. Боровиков. – М. : Горячая линия-Телеком, 2018. – 354 с.
 16. Тейлор, К. Химия цемента / К. Тейлор. – М. : МИР, 1986. – С. 174-276; 300-319; 418-429.
 17. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В. В. Бабицкий. – Минск, 2005. – С. 29-89; 167-178.
 18. Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Огороков, А. А. Парийский. – Л. : Стройиздат, 1966. – 316 с.
 19. Кобзарь, А. И. Прикладная математическая статистика / А. И. Кобзарь. – М. : Физматлит, 2006. – 816 с.

Статья поступила: 02.07.2019

REFERENCES

1. ССЧА-2007. *Himicheskie dobavki dlya betonov i stroitelnyih ras-tvorov. Katalog* [Chemical additives for concrete and mortar. Catalog]. Minsk: Ministry of Architecture and Construction Republic of Belarus. 2007. 57 p. (rus)
2. Lysov V. P. *Effektivnost betonnyh rabot v stroitelstve* [The effectiveness of concrete work in construction]. Minsk: Belarus. 1982. 92 p. (rus)
3. Arbenev A. S. *Zimnee betonirovanie s elektrorazogrevom smesi* [Winter concreting with electric mixture]. Moscow: Stroyizdat. 1970. 103 p. (rus)
4. Besser Ya. R. *Metody zimnego betonirovaniya* [Winter concreting methods]. Moscow: Stroyizdat. 1976. 168 p. (rus)

5. STB EN 12350-3-2012. *Metodyi ispytaniy betonnoy smesi. Chast 3. Metod Vebe* [Test methods for concrete mix. Part 3. Vebe's method]. Minsk: Stroytehnorm. 2013. 9 p. (rus)
6. *P1-99 k SNiP 3.09.01-85. Primenenie dobavok v beton* [Handbook P1-99 to SNiP 3.09.01-85. The use of additives in concrete.]. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus. 2000. 33 p. (rus)
7. Batyanovskiy E. I., Ivanova E. I., Osos R. F. *Stroitel'naya nauka i tehnika*. 2006. No. 6. pp. 7-17. (rus)
8. Sheyda O. Yu., Korbut E. E., Batyanovskiy E. I. *Bulletin of the Belarusian-Russian University*. 2012. No. 2. pp. 153-164. (rus)
9. STB 1544-2005. *Betony konstruktivnyye tyazhelye. Tehnicheskie usloviya* [Concrete constructive heavy. Technical conditions]. Minsk: Ministry of Architecture and Construction Republic of Belarus. 2005. 20 p. (rus)
10. Saymon D. *Analiz dannyh v Excel – naglyadny kurs sozdaniya otchetov, diagramm i svodnyh tablits* [Data Analysis in Excel – a visual course of creating reports, charts and pivot tables]. Moscow: Dialektika, 2004. 528 p. (rus)
11. Sheyda O. Yu., Batyanovskiy E. I. *Science and technology*. 2015. No. 2. pp. 30-38. (rus)
12. TCP 45-5.03-21-2006. *Betonnyye raboty pri otritsatel'nykh temperaturakh vozdukh. Pravila proizvodstva* [Concrete work at negative air temperatures. Production rules]. Minsk: Stroytehnorm. 2006. 107 p. (rus)
13. Batyanovsky E. I., Osos R. F. *Problems of production technology of building materials, products and structures, construction of buildings and structures*. 1998. No. 1. pp. 22-25. (rus)
14. GOST 10180-90. *Betony. Metody opredeleniya prochnosti po kontrol'nyim obraztsam* [Concretes. Methods for determining the strength of the control samples]. Moscow: NIIZhB RF. 1998. 45 p. (rus)
15. Borovikov V. P. *Populyarnoye vvedeniye v sovremennyy analiz dannykh i mashinnoye obucheniye na STATISTICA* [A popular introduction to modern data analysis and machine learning at STATISTICA]. Moscow: Goryachaya liniya-Telekom. 2018. 354 p. (rus)

16. Taylor K. *Himiya tsementa* [Chemistry of cement]. Moscow: MIR. 1986. pp. 174-276; 300-319; 418-429. (rus)
17. Babitckiy V. V. *Struktura i korrozionnaya stoykost` betona i zhelezobetona* [Structure and corrosion resistance of concrete and reinforced concrete]. Dissetratsiya d-ra tekhn. nauk: 05.23.05. Minsk. 2005. pp. 29-89; 167-178. (rus)
18. Zaporozhets I. D., Okorokov S. D., Pariyskiy A. A. *Teplovydeleniye betona* [Heat dissipation of concrete]. Leningrad: Stroiizdat. 1966. 316 p. (rus)
19. Kobzar' A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* [Applied Mathematical Statistics]. Moscow: Fizmatlit. 2006. 816 p. (rus)

Received: 02.07.2019