

DOI: 10.21122/2227-1031-2016-15-4-271–280

УДК 666:941; 693.54

## Кинетика твердения бетона с нанокуглеродной добавкой УКД-1 в варианте беспрогревной технологии

Асп. О. Ю. Марко<sup>1)</sup>, докт. техн. наук, проф. Э. И. Батяновский<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусско-Российский университет (Могилев, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2016  
Belarusian National Technical University, 2016

**Реферат.** Изложены результаты исследований влияния отечественной комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал и характеризующейся совмещенным (ускоряющим твердение и пластифицирующим) эффектом на кинетику твердения бетона в беспрогревном варианте технологии монолитного бетонирования. С использованием стандартизированных и оригинальных методик экспериментально выявлены закономерности роста прочности тяжелого цементного бетона под влиянием отдельно взятого ускоряющего компонента добавки УКД-1 и самой этой добавки в зависимости от ее дозировки (в диапазоне 0,5–2,0 % от массы цемента). 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:** бетон, кинетика твердения, нанокуглеродная добавка УКД-1, беспрогревная технология

**Для цитирования:** Марко, О. Ю. Кинетика твердения бетона с нанокуглеродной добавкой УКД-1 в варианте беспрогревной технологии / О. Ю. Марко, Э. И. Батяновский // *Наука и техника*. 2016. Т. 15, № 4. С. 271–280

## Curing Kinetics of Concrete with UKD-1-Nanocarbon Additive in Version of Non Warm-Up Technology

О. Yu. Marko<sup>1)</sup>, E. I. Batyanovsky<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian-Russian University (Mogilev, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** The paper presents results of investigations on influence of domestic complex chemical additive containing structured carbon nanomaterial and characterized by combined (curing acceleration and plasticizing) effect on concrete curing kinetics in non warm-up version of monolithic concreting technology. Standardized and original methods have revealed experimentally regularities in increase of strength for heavy cement concrete under the influence of specific accelerating UKD-1 additive component and the additive itself according to its dosage (within the range of 0.5–2.0 % of cement mass). Growth rate dependences for the concrete with UKD-1 additive on basic technological factors: cement quality, water-cement ratio value, concrete composition and concrete mixture consistency, curing environment temperature and heat-insulating characteristics of shuttering blocks have been evaluated in the paper. Such approach has made it possible to substantiate rational modes and parameters of conditions for concrete curing with the UKD-1 additive in order to ensure strength (under compression) in the 50–100 % range of the required value at the project age of 28 days without energy consumption for acceleration of its curing.

**Keywords:** concrete, curing kinetics, UKD-1-nanocarbon additive, non warm-up technology

**For citation:** Marko O. Yu., Batyanovsky E. I. (2016) Curing Kinetics of Concrete with UKD-1-Nanocarbon Additive in Version of Non Warm-Up Technology. *Science & Technique*. 15 (4), 271–280 (in Russian)

### Адрес для переписки

Батяновский Эдуард Иванович  
Белорусский национальный технический университет  
просп. Независимости, 150,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 265-95-87  
TBSM@bntu.by

### Address for correspondence

Batyanovsky Eduard I.  
Belarusian National Technical University  
150 Nezavisimosty Ave.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 265-95-87  
TBSM@bntu.by

## Введение

Технологию бетонирования, при которой бетон конструкций твердеет без подвода теплоты от искусственных внешних источников, принято называть беспрогревной [1–3]. Естественно, что она характеризуется минимальными затратами энергии, но одновременно и относительно невысоким темпом роста прочности бетона. А это сопровождается увеличением периода оборота опалубок и сроков строительства из монолитного бетона и увеличением технологического цикла изготовления сборных изделий. В статье приведены результаты исследований, предлагающих решение задачи по ускорению темпа роста прочности бетона в беспрогревном варианте технологии монолитного бетонирования и при изготовлении сборных изделий за счет введения в его состав комплексной добавки УКД-1. Повышенная эффективность этой добавки обеспечивается тем, что на стадии приготовления бетона она позволяет снизить на 15–25 % начальное водосодержание (за счет пластифицирующего компонента), а на стадии твердения бетона – ускорить гидролизно-гидратационные процессы в цементном тесте за счет совместного действия химической добавки – сульфата натрия и введенного в состав комплекса углеродного наноматериала (УНМ). Кроме того, структурированный УНМ (в виде ультрадисперсных частиц, а также моно- и многослойных трубок (волокон)) проявляет эффект нано-, микроармирования структуры затвердевшего цементного камня в бетоне, что обеспечивает рост его прочности на осевое растяжение и сжатие до 25 % и 15–20 % соответственно [4–6]. Под влиянием комплекса УКД-1, как будет показано далее, эффективность возрастает и соответствует приросту прочности бетона на сжатие в проектном (28 сут.) возрасте до 30 %, а за 24–48 ч твердения – в 1,5–2 раза, что и составляет основу эффективной беспрогревной технологии монолитного бетонирования (либо изготовления сборных изделий) с применением этой добавки.

## Общая методика экспериментальных исследований

На начальном этапе исследований по кинетике твердения (росту прочности на сжатие) бетона определили оптимальную дози-

ровку добавки УКД-1 в бетон по методике ГОСТ 30459–96 [7] на контрольном составе бетона: цемента (М500 Д0; ОАО «Красносельскстройматериалы») Ц = 350 кг; щебня (гранитного по ГОСТ 8267–93: фракции 5–20 мм;  $\rho_{щ}^0 \sim 1440 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{щ}^3 \sim 2700 \text{ кг/м}^3$ ) Щ = 1100 кг; природного песка (по ГОСТ 8736–93:  $\rho_{п}^0 \sim 1550 \text{ кг/м}^3$ ;  $\rho_{п}^3 \sim 2650 \text{ кг/м}^3$ ;  $M_k \sim 2,45$ ) П = 750 кг; воды В = 175 кг; подвижность смеси ОК ~ 3–4 при твердении образцов размера 100×100×100 мм в нормально-влажностных ( $\phi \geq 90 \%$ ;  $t \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) условиях. Для сравнения оценивали кинетику твердения бетона без добавок, с добавкой ускорителя твердения сульфата натрия (СН) и с исследуемой добавкой УКД-1 в разных дозировках относительно массы цемента.

Затем исследовали режимы твердения бетона по беспрогревной технологии при изменении температуры окружающей среды от 5 до 30 °С. При этом образцы бетона твердели в формах, имитирующих опалубки различных типов (табл. 1), с существенным различием коэффициентов теплопередачи  $K_T = 0,6\text{--}3,5 \text{ Вт/(м}^2\cdot^\circ\text{C)}$  при скорости ветра  $v_b = 0$ . В данных экспериментах и далее использовали составы бетона, наиболее широко применяемых классов по прочности  $C^{12/15}\text{--}C^{32/40}$ , приведенные в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики форм-опалубок  
Characteristics of shuttering blocks

Материал формы-опалубки и крышки	$K_T$ (расчетный) стенок формы (крышки), Вт/(м <sup>2</sup> ·°С), при $v_b = 0$
1. Доска, 25 мм	2,44
2. Металл (сталь), 10 мм	3,50
3. Металл (10 мм) + минераловатная плита (60 мм)	~1,00
4. Фанера (12 мм) + минераловатная плита (60 мм)	~2,98; ~0,60*
* С утеплением.	

Составы бетона с добавкой ускорителя твердения СН приняты для оценки (сравнения) эффективности исследуемой добавки УКД-1. Известно, что монодобавка СН в дозировке 1 % от массы цемента (далее – МЦ) может обеспечить реализацию весьма эффективных (со сниженными по затратам энергии) технологий

изготовления сборных изделий [1–3, 8], а сопоставление (при прочих равных условиях) результатов экспериментов позволит выявить уровень эффективности добавки УКД-1.

Таблица 2  
Составы бетона для исследований  
Concrete compositions for investigations

Номер состава бетона	Класс бетона	Подвижность бетонной смеси (ОК), см	Марка цемента	Расход составляющих, кг/1 м <sup>3</sup> бетона				В/Ц бетона	Относительное водосодержание цементного теста (X), доли ед.
				Ц	П	Щ	В		
<b>А. Состав без добавок</b>									
1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	12–14	M400	380	685	1100	201	0,53	1,60
2	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	12–14	M500	465	590	1090	208	0,45	1,42
<b>Б. Состав с добавкой 1 % СН</b>									
3	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	12–14	M400	360	720	1100	182	0,50	1,44
4	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	12–14	M500	442	625	1100	195	0,44	1,38
<b>В. Состав с комплексной добавкой 1 % УКД-1</b>									
5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	12–14	M400	340	715	1150	163	0,48	1,32
6	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	21–23	M400	405	720	1065	180	0,44	1,27
7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	12–14	M500	345	725	1175	146	0,42	1,20
8	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	21–23	M500	420	720	1065	175	0,41	1,26
9	C <sup>32</sup> / <sub>40</sub>	12–14	M500	400	695	1150	156	0,39	1,12

В процессе исследований периодически испытывали образцы бетона на прочность (сжатие). Эти результаты отражали кинетику ее роста в условиях, характеризовавшихся различной температурой окружающей среды и коэффициентом теплопередачи опалубки. Одновременно оценивали различные условия для накопления (аккумуляции) теплоты экзотермии цемента и обусловленного этим уровня температуры саморазогрева бетона, что фиксировали с помощью датчиков-термопар, установленных в геометрический центр бетонных образцов размерами 150×150×150 мм. Выявленные закономерности саморазогрева бетона и влияния его на кинетику роста прочности бетона с добавкой УКД-1 позволили в последующем сформулировать рекомендации по назначению режимов его естественного твердения (беспрогревная технология) в зависимости от качества

цемента, температуры окружающей среды, начальной температуры свежееуложенного бетона и теплоизолирующих качеств опалубки.

### Кинетика роста прочности бетона с добавкой при твердении в нормально-влажностных условиях

Результаты экспериментов, отражающие зависимость кинетики роста прочности 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 % Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> от массы цемента, взятом для сравнения с [1, 3, 9]), приведены в табл. 3. Даны средние значения относительной (в % от проектной (28 сут.) прочности бетона без добавок) прочности в серии (не менее трех образцов), приведенной с поправочным масштабным коэффициентом 0,95 по ГОСТ 10180–2012 [10]; внутрисерийный коэффициент вариации не превышал 7–8 %.

Таблица 3  
Влияние добавки УКД-1 на кинетику твердения бетона в нормально-влажностных условиях  
Influence of UKD-1-additive on concrete curing kinetics under normal moisture conditions

Вид и количество добавки, % от МЦ	Прочность бетона, % от проектной, в возрасте, сут.					Прочность на сжатие в возрасте 28 сут.	
	1	2	3	4	7	МПа	%
Без добавок	26	43	53,0	60	71,0	38,5	100
СН; 1,00	42	66	78,0	82	91,0	40,8	106
«УКД-1»; 0,50	42	67	79,5	84	93,0	43,1	112
«УКД-1»; 0,75	44	71	83,0	91	100,5	45,4	118
«УКД-1»; 1,00	48	77	92,0	100	110,0	48,5	126
«УКД-1»; 1,50	49	78	94,0	104	111,0	49,7	129
«УКД-1»; 2,00	50	80	95,0	106	113,0	50,0	130
«УКД-1»; 1,00*	28	46	58,0	63	76,0	40,8	106
«УКД-1»; 1,50*	26	44	55,0	61	73,0	39,7	103

\* Составы без уменьшения расхода воды; бетонная смесь характеризовалась подвижностью ОК<sub>1,0</sub> ~ 16–18 см и ОК<sub>1,5</sub> ~ 23–25 см соответственно.

Из данных табл. 3 следует, что по критерию роста прочности – расход добавки наиболее рациональна дозировка добавки УКД-1, равная ~1 % от массы цемента. Так, если увеличение относительной прочности бетона с ростом ее дозировки от 0,5 до 1,0 % в начальные сроки (1–3-и сут.) составило: (48 – 42) : 42 · 100 ~ 14,3 %

и  $(92 - 79,5) : 79,5 \sim 15,7 \%$ , а к 28-м сут. –  $(128 - 112) : 112 \cdot 100 \sim 12,5 \%$ , то с увеличением дозировки от 1,0 до 2,0 % выявлен рост прочности в 1–3-и сут. твердения:  $(50 - 48) : 48 \cdot 100 \sim 4,2 \%$ ;  $(106 - 100) : 100 \cdot 100 \sim 6 \%$ , а к проектному возрасту:  $(130 - 126) : 126 \cdot 100 \sim 3,2 \%$ . На этом основании в последующих исследованиях использовали добавку УКД-1 в дозировке 1 % от МЦ.

Анализ всей совокупности результатов экспериментов (табл. 3, рис. 1) показывает преимущество комплексной добавки УКД-1 в сравнении с монодобавкой ускорителя твердения СН. Одновременно следует отметить, что, несмотря на снижение водосодержания бетона в равноподвижных смесях при введении добавки УКД-1 в дозировке 0,50–0,75 % от МЦ, его прочность в начальные сроки (1–2 сут.) твердения незначительно (на 2–5 %) превышала прочность с 1 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Очевидно, что этот эффект связан с замедляющим реакцией цемента с водой действием пластифицирующего компонента УКД-1. Однако в целом уровень прочности образцов бетона с добавкой УКД-1 оказался выше, чем образцов с 1 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , несмотря на то что ускоряющего компонента (того же  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) в УКД-1 при ее дозировке 0,5–1,0 % от МЦ заведомо меньше (0,375–0,700 % от массы вещества добавки УКД-1). Отсюда следует вывод о дополнительном эффекте ускорения твердения (роста прочности) цементного бетона «присадкой» структурированного углеродного наноматериала, содержащегося в добавке УКД-1 и установленного в исследованиях [4, 6, 11].

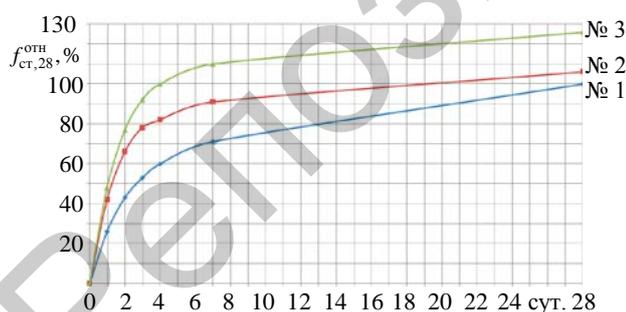


Рис. 1. Тенденция кинетики твердения бетона в нормально-влажностных условиях:  
 № 1 – бетон без добавок; № 2 – с 1 %  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  
 № 3 – с 1 % УКД-1

Fig. 1. Tendencies in concrete curing kinetics under normal moisture conditions:  
 No 1 – concrete without additives;  
 No 2 – with 1 % of  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ;  
 No 3 – with 1 % of UKD-1

По результатам экспериментов, к проектному возрасту (28 сут.) прочность бетона с добавкой УКД-1 составила от 112 % (0,5 % УКД-1) до 130 % (2,0 % УКД-1) относительно прочности образцов бетона из равноподвижных смесей без добавок. При этом за 24–48 ч твердения превышение составило  $\sim 1,9$  раза, а уровень прочности бетона от проектной, достигающей порядка 50 % (через 24 ч) и 70–80 % (через 48 ч), обеспечивает бездефектную распалубку конструкций с ненапрягаемой арматурой в пределах суток, а с напрягаемой – через 48 ч твердения в нормальных температурно-влажностных условиях.

Одновременно выявлено, что введение добавки УКД-1 с целью пластификации бетона (составы со звездочкой в табл. 3; подвижность бетонной смеси  $\text{OK}_{1,0} \sim 16\text{--}18$  см и  $\text{OK}_{1,5} \sim 23\text{--}25$  см (литая смесь)) замедлило темп роста его прочности в сравнении с бетоном с этой добавкой подвижностью 3–4 см. Вместе с тем по сравнению с бетоном без добавок аналогичного состава темп роста прочности пластифицированного бетона не только не изменился, но и характеризуется (3–6)%-м приростом прочности с 1,0–1,5 % УКД-1 в проектном (28 сут.) возрасте.

### Кинетика твердения бетона в условиях «термоса»

Основная задача настоящего этапа исследований – установление зависимости кинетики роста прочности бетона с добавкой УКД-1 от его саморазогрева за счет аккумуляции теплоты экзотермии цемента. Известно, что в процессе реакции с водой затворения минералов портландцементного клинкера выделяется значительное количество теплоты. Ее аккумуляция (путем гидро-, теплоизоляции твердеющего бетона) способствует росту его температуры, что в свою очередь интенсифицирует реакции цемента с водой и тем самым повышает его тепловыделение в 1–3-и сут. твердения, а в результате – повышает темп роста прочности бетона. Этот эффект возрастает с введением в реагирующую систему цемент – вода добавок, ускоряющих твердение бетона [1, 12–15]. Таким образом, для реализации эффективной беспрогревной технологии цементного бетона необходимо максимально возможное использование экзотермии вяжущего, что может быть

достигнуто при твердении 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- и теплоизоляции. Для этого поверхность форм герметизировали полиэтиленовой пленкой и устанавливали в пенополистирольный ящик на период твердения. В геометрический центр одного из средних (в трехгнездных формах) образцов устанавливали датчик-термопару для контроля над изменениями температуры. Начальную температуру бетона приняли в диапазонах 5–8; 12–15 и 18–22 °С, как наиболее характерных для весенне-летне-осеннего периода ведения работ в Беларуси. В качестве примера использовали составы бетона класса  $C^{12}/_{15}$  (ОК ~ 12–14 см) № 1 (без добавки) и № 3 (1 % УКД-1). Периодически контролируя изменения температуры и прочность твердеющего бетона, получили данные, приведенные в табл. 4.

Таблица 4

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

**Kinetics in temperature change and concrete strength in case of curing under thermos conditions**

Порядковый номер состава по табл. 2	Группа эффективности цемента М400	Температура бетона, °С, к исходу суток				Прочность бетона, % от $f_{ct,28}$ , через сутки		
		0*	1	2	3	1	2	3
<b>А. Состав без добавок</b>								
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
<b>Б. Состав с добавкой УКД-1</b>								
3	I	6	9	17	24	32	50	65
3	I	13	18	28	33	41	58	74
3	I	20	28	37	42	54	79	96
3	II	6	8	14	21	27	46	63
3	II	13	15	25	29	36	51	70
3	II	20	25	33	38	51	74	89
3	III	6	8	12	16	21	44	53
3	III	13	15	22	24	32	52	62
3	III	20	21	28	31	35	56	72

\* Начальная температура свежееотформованного бетона.

Из результатов эксперимента следует, что сведение к минимуму потерь теплоты 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, т. е. фактически нормальный режим твердения.

Интенсификация процесса гидратации цемента добавкой УКД-1 повышает его тепловыделение, а аккумуляция теплоты обеспечивает саморазогрев бетона (увеличение температуры от начальной на 15–20 °С в первые 2–3 сут. твердения при использовании цемента II и I групп эффективности соответственно). Применение вяжущего III группы эффективности сопровождается низким тепловыделением и соответственно незначительным разогревом бетона и темпом роста его прочности. Фактически использование цемента III группы эффективности противоречит цели разработки и нецелесообразно для беспрогревной технологии.

Из полученных экспериментальных данных о кинетике роста прочности бетона с добавкой 1 % УКД-1 следует, что ее уровень  $\geq 50$  % от прочности проектного возраста (обеспечивающий условия бездефектной распалубки монолитных конструкций и сборных изделий с ненапрягаемой арматурой) 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  $f_{ct} \geq 50$  % и  $f_{ct} \geq 70$  % от  $f_{ct,28}$  составляет не менее двух, трех и четырех суток соответственно.

Очевидно, что для реализации эффективной беспрогревной технологии предпочтительны цементы I группы эффективности с допущением к применению цементов II группы эффективности.

#### **Кинетика твердения бетона в диапазоне температур 5–30 °С в зависимости от теплозащитных свойств (вида) опалубки**

Исследования с целью разработки режимов твердения бетона с добавкой 1 % УКД-1 без

подвода теплоты в диапазоне температур среды твердения 5–30 °С (начальная температура бетонной смеси равнялась 5–20 °С) для ведения бетонных работ монолитным способом выполнены с учетом ранее полученных данных. Формы, в которых твердел бетон, имитировали опалубку разных типов с характеристиками, приведенными в табл. 1. В экспериментах использовали цемент ОАО «Красносельскстройматериалы» марок М400 и М500 II группы эффективности при пропаривании; остальные материалы – в соответствии с ранее приведенными характеристиками.

Образцы бетона (размерами 150×150×150 мм) изготавливали в формах с укладкой вибрированием со стандартными параметрами (амплитуда  $A \sim 0,5$  мм; частота  $\sim 50$  Гц) в течение 5–10 с (для подвижности смеси марки П3) и штыкованием с постукиванием формы о жесткое основание (литая смесь марки П5). После формования поверхность укрывали полиэтиленовой пленкой и крышкой, материал которой (а при термостатировании бетона и материал теплоизоляции) соответствовал материалу (теплоизоляции) стенок формы-опалубки. Данные экспериментальных исследований кинетики твердения бетона по росту его прочности на сжатие (внутрисерийный коэффициент вариации  $V_m = 10$  %), выраженной в процентах от принятого за 100 % уровня прочности бетона аналогичных составов без добавок в проектном возрасте (28 сут.) представлены в табл. 5, а тенденция роста прочности отражена графиками на рис. 2. Результаты с индексом «\*» получены при твердении бетона в утепленных минеральной ватой (толщина  $\sim 60$  мм) металлических и фанерных формах.

Из результатов экспериментов следует, что использование добавки УКД-1 обеспечивает стабильный рост прочности бетона в сравнении с равноподвижным бетоном без добавки (составы № 1 и 2; классы  $C^{12}/_{15}$  и  $C^{25}/_{30}$ ) при всех вариантах материала палубы опалубки (металл, деревянная доска, фанера), а также с утеплением (термоизоляцией) опалубки или без него для оцениваемого диапазона температуры окружающей среды 5–30 °С. Так, повышение темпа роста прочности в 1–7 сут. составило примерно 1,5–2 раза за счет эффектов сни-

жения водосодержания в бетоне и ускоряющего действия СН и УНМ. Следует отметить, что при этом начальная температура смеси соответствовала условию  $t_{см} \approx t_{нв}$  (температура наружного воздуха, т. е. среды твердения), т. е. была примерно равной 6 °С для  $t_{нв} \sim 5–8$  °С; 13 °С – для  $t_{нв} \sim 12–15$  °С и  $t_{см} \sim 18$  °С – при  $t_{нв} \sim 18–22$  °С, а также для  $t_{нв} \sim 25–30$  °С.

Таблица 5

**Кинетика роста прочности бетона**  
**Kinetics in growth of concrete strength**

Температура среды твердения, °С	Характеристика бетона		Наличие и вид добавки	Прочность бетона, % от $f_{ст28}$ , в возрасте, сут.				
	Состав по табл. 2	Класс		1	2	3	4	7
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>А. Твердение в металлических формах*</b>								
5–8**	1	$C^{12}/_{15}$	–	10	19	27	36	44
	2	$C^{25}/_{30}$	–	12	22	30	38	45
	5	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	24	38	49	59	74
	6	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	25	37	50	60	72
	7	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	26	36	52	61	72
	8	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	25	37	52	62	74
	7*	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	25	46	58	73	84
12–15**	1	$C^{12}/_{15}$	–	16	25	37	48	55
	2	$C^{25}/_{30}$	–	17	27	38	51	57
	5	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	29	44	59	70	75
	6	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	30	43	59	72	76
	7	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	30	44	60	71	77
	8	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	28	45	59	72	75
	7*	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	36	51	70	79	93
18–22**	1	$C^{12}/_{15}$	–	22	40	50	60	70
	2	$C^{25}/_{30}$	–	25	45	53	61	72
	5	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	34	62	76	83	93
	6	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	33	62	75	83	90
	7	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	35	64	75	86	93
	8	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	36	65	76	85	91
	7*	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	52	71	85	94	102
25–30	1	$C^{12}/_{15}$	–	30	50	72	80	86
	2	$C^{25}/_{30}$	–	34	53	72	81	90
	5	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	52	76	85	95	102
	6	$C^{12}/_{15}$	УКД-1	50	76	87	94	103
	7	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	53	77	87	96	103
	8	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	52	75	86	96	102
	7*	$C^{25}/_{30}$	УКД-1	58	83	96	101	106

Окончание табл. 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Б. Твердение в фанерных формах*</b>								
5–8	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	16	27	37	46	56
	2	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	–	17	28	38	51	58
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	29	44	59	70	75
	6	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	30	44	60	71	76
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	31	45	62	72	77
	8	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	28	45	61	72	75
	5*	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	38	52	69	77	92
	7*	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	38	55	70	79	93
12–15	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	23	41	52	61	70
	2	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	–	24	43	53	62	72
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	34	68	76	84	92
	6	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	33	62	75	83	90
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	35	63	75	86	93
	8	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	36	65	76	85	91
	5*	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	41	71	80	91	97
	7*	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	42	70	82	93	99
18–22	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	32	50	71	82	87
	2	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	–	34	53	72	81	90
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	45	75	85	95	102
	6	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	47	74	87	96	103
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	48	74	86	96	103
	8	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	47	73	86	95	102
	5*	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	52	81	93	99	101
	7*	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	57	82	94	100	103
25–30	1	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	–	41	60	79	87	95
	2	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	–	42	63	80	90	96
	5	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	53	82	95	100	105
	6	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	51	80	96	100	104
	7	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	54	82	96	101	106
	8	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	51	80	97	103	105
	5*	C <sup>12</sup> / <sub>15</sub>	УКД-1	53	82	95	100	104
	7*	C <sup>25</sup> / <sub>30</sub>	УКД-1	56	86	99	103	106

\* С утеплением.  
 \*\* Для указанных диапазонов начальная температура бетонной смеси соответствовала этим значениям; для  $t_{cp} \sim 25-30$  °C температура смеси соответствовала  $\sim 20$  °C.

Анализируя влияние консистенции (подвижности) бетонной смеси на темп твердения бетона, приготовленного из смесей различной подвижности, приходим к выводу, что в пределах выполненных экспериментов явно выраженная взаимосвязь этих факторов отсутствует. Например, при сравнении кинетики роста прочности бетона составов № 5 и 6, а также № 7 и 8 (табл. 2), которые характеризуются подвижностью смеси марок ПЗ и П5 соответственно, ста-

новится очевидным примерно равнозначный прирост прочности бетона при прочих равных условиях (температура среды, материал форм, степень теплоизолированности форм). Эти данные в некоторой мере противоречат известной из традиционной технологии бетона тенденции – снижения темпа роста его прочности с ростом подвижности смеси.

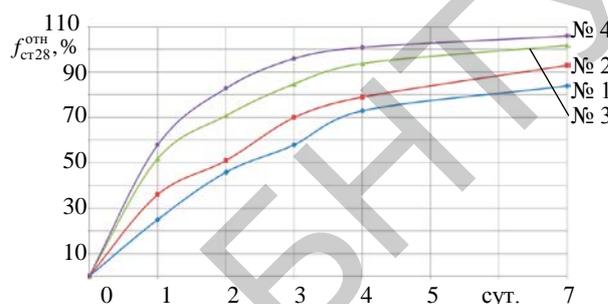


Рис. 2. Тенденция роста прочности бетона (класс C<sup>25</sup>/<sub>30</sub>) с добавкой 1 % УКД-1 в металлических теплоизолированных формах; № 1–4 – для температуры среды  $t_{нб} = 5-8; 12-15; 18-22$  и  $25-30$  °C соответственно

Fig. 2. Tendency in growth of concrete strength (class C<sup>25</sup>/<sub>30</sub>) with 1 % UDK-1 additive in metallic heat-insulated blocks; Nos. 1–4 – for environment temperature  $t_{нб} = 5-8; 12-15; 18-22$  and  $25-30$  °C respectively

Это можно объяснить следующим. В проведенных экспериментах сохранение практически постоянным темпа роста прочности бетона при увеличении пластичности смеси обусловлено тем, что повышение последней достигнуто за счет эффекта пластификации комплексной добавки при рациональной корректировке состава бетона. В результате более пластичная смесь (составы № 6 и 8) характеризуется величиной  $(B/\Pi)_{бет}$  и относительного водосодержания ( $X$ ) даже несколько ниже начальной (составы № 5 и 7), что и обеспечивает необходимые условия для сохранения кинетики роста прочности бетона на равнозначном уровне в сравнении с бетоном из смеси меньшей подвижности.

Влияние материала форм (опалубки) на кинетику роста прочности бетона непосредственно связано с их теплоизолирующими свойствами и влиянием на температурный режим его твердения, т. е. с обеспечением условий для аккумуляции теплоты экзотермии цемента и повышения температуры бетона в процессе твердения. Анализируемые результаты (табл. 4) получены для бетона на цементе II группы эф-

фективности при пропаривании, степень само-разогрева которого оценивается приростом температуры бетона с добавкой (от начальной температуры смеси) на  $\sim 15$  °С при твердении в условиях «термоса».

Сравнительный анализ тенденций роста прочности бетона, отраженных графическими зависимостями на рис. 2, построенными по данным разделов А (металлические формы) и Б (формы из фанеры) табл. 5, при прочих равных условиях показывает следующую закономерность. Чем ниже температура среды твердения, тем более эффективно использование опалубки с меньшим коэффициентом теплопроводности, в частности с деревянной палубой, в сравнении с металлической либо металлической, но с утеплением. В металлической палубе минимален эффект накопления теплоты экзотермии цемента, так как ее коэффициент теплопередачи на  $\sim 40$  % превышает таковой для фанерной палубы (табл. 5).

Вместе с тем с повышением температуры среды твердения до 25–30 °С кинетика роста прочности бетона и в металлических, и в фанерных формах без утепления в первые 24 ч начинает сближаться и через 48 ч становится почти равнозначной. Это связано с изменением условий теплообмена в системе форма – внешняя среда и со снижением потерь теплоты внешним контуром форм с ростом  $t_{\text{нв}}$  до  $\sim 30$  °С. Данная тенденция в общих чертах сохраняется при использовании термоизолированных форм-опалубок; при этом – с большим эффектом от применения опалубки с «теплой» палубой из фанеры в сравнении с металлической палубой.

В целом эффективность опалубок по критерию влияния на темп роста прочности бетона, твердеющего в естественных условиях (беспрогревная технология), связана обратной зависимостью со значением коэффициента их теплопередачи. По экспериментальным данным, в диапазоне температур среды твердения 5–30 °С они по этому показателю располагаются в ряд: утепленная опалубка с палубой из фанеры или дерева, утепленная металлическая, деревянная или из фанеры, металлическая, т. е. в соответствии с ростом  $K_T \sim 0,6\text{--}3,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) для указанных разновидностей опалубки.

Оценивая эффективность применения термоизолированных опалубок для обеспечения беспрогревной технологии монолитного бетонирования по анализируемым экспериментальным данным, приходим к выводу, что в сочетании с использованием добавки УКД-1 они создают необходимые условия для обеспечения прочности бетона в 50 % от проектной за 48–60 ч твердения при температуре среды 5–8 °С, за 24–48 ч – при  $t_{\text{нв}} \sim 12\text{--}15$  °С, за 24 ч – при  $t_{\text{нв}} \sim 20\text{--}30$  °С. Прочность бетона  $\geq 70$  % от проектной в аналогичных условиях обеспечивается за 3–4, 2–3, 2 сут. соответственно. Меньшие значения времени твердения относятся к опалубке с фанерной (деревянной) палубой ( $K_T \sim 0,6$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С) при скорости ветра 0. Приведенные значения прочности бетона обеспечивают бездефектную распалубку вертикальных и наклонных конструкций ( $\geq 50$  %), а также изгибаемых и с преднапряжением арматуры ( $\geq 70$  %). Из полученных экспериментальных данных можно сделать вывод, что утепленные опалубки рекомендуются к использованию и в летний период работ, так как обеспечивают наиболее благоприятный температурный режим твердения бетона за счет аккумуляции (накопления) теплоты экзотермии цемента в его объеме.

## ВЫВОДЫ

1. Установлена рациональная дозировка в бетон добавки УКД-1, которая обеспечивает рост подвижности бетонной смеси от марки П1 до марки П4, а при снижении водосодержания бетона и соблюдении условия равноподвижности смеси (марка П1) рост его прочности в проектном возрасте до 25 %, составляющая  $\sim 1,0$  % от массы цемента при рекомендуемых по действующим техническим условиям пределах дозирования этой добавки (0,5–1,5) % от МЦ.

2. Экспериментально установлено, 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-е сут. 45–50 % от проектной ( $\sim 25$  % без добавок), достигает 70–80 % через 2 сут. и  $\geq 90$  % – через 3 сут. (без добавок  $\sim 45$  % и 55 % соответственно), чем обеспе-

чиваются необходимые и достаточные предпосылки для реализации эффективной беспрогревной технологии монолитного бетонирования и изготовления сборных изделий.

3. Экспериментально выявлены закономерности изменения температуры и прочности бетона с добавкой 1 % УКД-1 и без нее, твердеющего в условиях теплоизоляции (условиях «термоса») в течение 1–3 сут. (т. е. накапливая теплоту экзотермии вяжущего) при начальной температуре смеси 6, 13 и 20 °С и цементах I, II и III групп эффективности. Зафиксирован уровень саморазогрева бетона без добавок на 8–13 °С сверх начальной температуры смеси (большее значение для цемента I группы эффективности), а также с 1 % УКД-1 (на цементе I группы) – на 18–22 °С сверх начальной температуры смеси (большее значение – для  $t_{б.см}^{нач} \sim 20$  °С), что обеспечивает уровень температуры твердеющего бетона до 30–40 °С и высокий темп роста его прочности без дополнительного подвода теплоты от внешних источников.

4. Экспериментально исследована кинетика роста прочности бетонов (на примере классов  $C^{12/15}$ – $C^{32/40}$ ) при подвижности марок ПЗ и П5 на цементе II группы эффективности, т. е. наиболее широко применяемых в общестроительном производстве) в диапазоне температур бетонной смеси 5–20 °С и наружного воздуха 5–30 °С (соответствующем условиям ведения работ в весенне-летне-осенний период в Беларуси), при твердении образцов в различных видах форм (опалубки), характеризующихся разными коэффициентами теплопередачи:  $K_T \sim 0,6$ – $3,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·°С), что соответствует применяемым в строительстве типажам опалубок. Определены режимы твердения бетона с добавкой УКД-1 без подвода теплоты от внешних источников (по беспрогревной технологии), обеспечивающие достижение прочности бетона в диапазоне 50–100 % от прочности проектного (28 сут.) возраста с учетом конкретных условий ведения работ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Батяновский, Э. И. Технологические особенности производства ЖБК с применением ускорителей твердения бетона / Э. И. Батяновский, Р. Ф. Осос // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительство зданий и сооружений: сб. ст.; под ред. Н. П. Блещика, Э. И. Батяновского. Брест: БрПИ, 1998. Вып. 1. С. 22–25.
2. Парфенова, Л. М. Перспективы применения химических добавок в малоэнергоемких технологиях возведения бетонных и железобетонных конструкций / Л. М. Парфенова // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: материалы VI Междунар. науч.-техн. семинара, Минск, 17–20 окт. 2000 г.; под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецольда. Минск: Технопринт, 2000. С. 84–88.
3. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. И. Иванова, Р. Ф. Осос // Строительная наука и техника. 2006. № 3. С. 7–17.
4. Батяновский, Э. И. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента / Э. И. Батяновский, П. В. Рябчиков, В. Д. Якимович // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь: XVI Междунар. науч.-метод. семинар; под общ. ред. П. С. Пойты, В. В. Тура. Брест: БрГТУ, 2009. Ч. 2. С. 136.
5. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня / Э. И. Батяновский [и др.] // Строительная наука и техника. 2010. № 1–2. С. 3–10.
6. Батяновский, Э. И. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая наноуглеродные добавки / Э. И. Батяновский, В. Д. Якимович, П. В. Рябчиков // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. материалов III Междунар. симпозиума. Минск: РУП «БелНИИС», 2011. Т. 2. С. 53–68.
7. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности: ГОСТ 30459–96. Введ. 01.07.98. Минск: Минсктиппроект, 1998. 40 с.
8. Марцинкевич, В. Л. Энергосберегающие технологии производства бетона / В. Л. Марцинкевич, А. С. Дыдышко. Минск, 2006. 283 с.
9. Применение добавок в бетоне: П1–99 к СНиП 3.09.01–85. Введ. 01.07.2000. Минск: Минстройархитектуры, 2000. 33 с.
10. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам: ГОСТ 10180–2012. Взамен ГОСТ 10180–90; введ. 01.07.2013. М.: Стандартинформ, 2013. 38 с.
11. Батяновский, Э. И. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах / Э. И. Батяновский, Г. С. Галузо, М. М. Мордич // Наука – образованию, производству, экономике: сб. материалов Девятой Междунар. науч.-техн. конф. Минск: БНТУ, 2011. Т. 2. С. 272–273.
12. Запорожец, И. Д. Тепловыделение бетона / И. Д. Запорожец, С. Д. Окороков, А. А. Парийский. Л.: Стройиздат, 1966. 316 с.
13. Тейлор, К. Химия цемента / К. Тейлор; пер. с англ. М.: МИР, 1986. С. 174–276; 300–319; 418–429.
14. Протько, Н. С. Беспрогревная и малоэнергоемкая технология производства бетонных и железобетонных изделий с применением полиметаллического водного концентрата / Н. С. Протько. Минск: Белор. гос. политехн. академия, 2001. 20 с.

15. Бабицкий, В. В. Структура и коррозионная стойкость бетона и железобетона / В. В. Бабицкий. Минск, 2005. С. 29–89; 167–178.

Поступила 14.03.2016

Подписана в печать 16.05.2016

Опубликована онлайн 28.07.2016

REFERENCES

1. Batyanovsky E. I., Osos R. F. (1998) Technological Peculiarities in Production of Reinforced Concrete Structures While Applying Concrete Rapid Hardener. *Problemy Tekhnologii Proizvodstva Stroitelnykh Materialov, Izdelii i Konstruktsii, Stroitelstvo Zdanii i Sooruzhenii. Sbornik Statei* [Problems in Technology of Production of Construction Materials, Products and Structures. Collection of Papers]. Brest: Brest Polytechnical Institute, 1, 22–25 (in Russian).
2. Parfionova L. M. (2000) Prospects for Application of Chemical Admixtures in Low-Energy Consuming Technologies for Concrete and Reinforced Concrete Structural Construction. *Perspektivy Razvitiia Novykh Tekhnologii v Stroitelstve i Podgotovke Inzhenernykh Kadrov v Respublike Belarus. Materialy VI Mezhdunar. Nauch.-Tekhn. Seminara* [Prospects for Development of New Technologies in Construction and Training of Engineering Personnel in the Republic of Belarus. Proceedings of 6<sup>th</sup> International Scientific and Technical Workshop]. Minsk, Tekhnoprint, 84–88 (in Russian).
3. Batyanovsky E. I., Ivanova E. I., Osos R. F. (2006) Efficiency and Problems of Energy-Saving Technologies for Cement Concrete. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (3), 7–17 (in Russian).
4. Batyanovsky E. I., Ryabchikov P. V., Yakimovich V. D. (2009) Influence of Carbonic Nano-Materials on Cement Properties. *Perspektivy Razvitiia Novykh Tekhnologii v Stroitelstve i Podgotovke Inzhenernykh kadrov Respubliki Belarus: XVI Mezhdunar. Nauch.-Metod. Seminar. Chast 2* [Prospects for the Development of New Technologies in the Construction and Preparation of the Engineering Staff of the Republic of Belarus. 16<sup>th</sup> International Scientific and Methodological Workshop. Part 2]. Brest: Brest State Technical University, 136 (in Russian).
5. Batyanovsky E. I., Krauklis A. V., Samtsov P. P., Riabchikov P. V. (2010) Influence of Carbonic Nano-Materials on Cement Properties and Cement Paste. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Technology], (1–2), 3–10.
6. Batyanovsky E. I., Yakimovich V. D., Ryabchikov P. V. (2011) Peculiarities in Technology of High-Strength Concrete on Local Materials Including Nanj-Carbonic Additives. *Problemy Sovremennogo Betona i Zhelezobetona. Sb. mater. III Mezhdunar. Simpoziuma. T. 2* [Problems of Modern Concrete and Reinforced Concrete. Information Package of 3<sup>rd</sup> International Symposium. Vol. 2.] Minsk, BelNIIS, 53–68 (in Russian).
7. State Standard 30459–96. Concrete Additives. Methods for Efficiency Determination. Minsk, Minsktipproekt, 1998. 40 (in Russian).
8. Martsinkevich V. L., Dydysko A. S. (2006) *Energy-Saving Technologies for Concrete Production*. Minsk. 283 (in Russian).
9. П1–99 for SNiP 3.09.01–85. Application of Additives for Concrete. Minsk, Minstroyarkhitektura, 2000. 33 (in Russian).
10. State Standard 10180–2012. Concrete. Methods for Determination of Strength in Accordance with Control Specimen. Moscow, Standartinform, 2013. 38 (in Russian).
11. Batyanovsky E. I., Galuzo G. S., Mordich M. M. (2011) Peculiarities in Application of Carbonic Nano-Materials in Structural and Insulation Foamed Concrete. *Nauka – Obrazovaniyu, Proizvodstvu, Ekonomike. Materialy Deviatoi Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Konferentsii. T. 2* [Science to Education, Industry, Economics. Proceedings of 9<sup>th</sup> International Science and Technical Conference. Vol. 2]. Minsk: BNTU, 272–273 (in Russian).
12. Zaporozhets I. D., Okorokov S. D., Pariysky A. A. (1966) *Heat Liberation of Concrete*. Leningrad, Stroyizdat. 316 (in Russian).
13. Taylor H. (1990) *Cement Chemistry*. 2<sup>nd</sup> ed. London, Academic Press. 491 (Russ. ed.: Teilor K. (1986) *Khimiia Tsementa*. Moscow, Mir, 174–276; 300–319; 418–429).
14. Protko N. S. (2001) *Non-Heating and Low Energy-Consuming Technology for Production of Concrete and Reinforced Concrete Products with Application of Polymetallic Water Concentrate*. Minsk: Belarusian State Polytechnical Academy. 20 (in Russian).
15. Babitsky V. V. (2005) *Structure and Corrosion Resistance of Concrete and Reinforced Concrete*. Minsk, 29–89; 167–178 (in Russian).

Received: 14.03.2016

Accepted: 16.05.2016

Published online: 28.07.2016