

КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА С ДОБАВКОЙ «УКД-1» ПРИ НИЗКОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА

Марко О.Ю.

Проблемы снижения энергетических затрат в строительном производстве, повышение темпа строительства зданий с применением монолитного бетона и железобетона не теряют со временем своей актуальности. Одним из технологических приемов решения этих задач является использование комплексных химических добавок в бетон, проявляющих эффект пластификации (и способствующих росту плотности и непроницаемости бетона за счет снижения его начального водосодержания) в сочетании с эффектом повышения темпа набора прочности, обеспечивающим ускорение оборота опалубок, а в итоге повышению темпа и сокращению сроков строительства.

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. В этой связи в настоящих исследованиях поставлена задача ускорения темпа роста прочности бетона в технологии монолитного бетонирования и снижения энергетических затрат при прогревах бетона. В частности, путем разработки энергосберегающих режимов его твердения за счет введения в состав комплексной добавки «УКД-1», понижения температуры и времени подвода энергии (тепла) при прогревах.

ОБЩАЯ МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На начальном этапе исследований по кинетике твердения (росту прочности на сжатие) бетона определили оптимальную дозировку добавки «УКД-1» в бетон по методике ГОСТ 30459-96 [1] на стандартизированном составе бетона (цемента (М500 Д0; Красносельскстрой-материалы) – 350 кг; ШЦ = 1100 кг; П = 750 кг; В = 175 кг; подвижность смеси: ОК ~ (3...4) см) и твердении образцов (150х150х150 мм) в нормально-влажных ($\phi \geq 90\%$; $t \sim 20^\circ\text{C}$) условиях. Для сравнения оценивали кинетику твердения бетона без добавки и с исследуемой добавкой «УКД-1» в дозировке 1% массы цемента. В исследованиях придерживались принципа равноподвижности бетонных смесей, поэтому в составе с «УКД-1» водосодержание (В/Ц)_б было ниже.

Диапазон температур наружной среды ($t_{на}$, °С) для исследований кинетики твердения (роста прочности) бетона с добавкой «УКД-1» был принят в диапазоне температуры 5...(-20) °С. Температуру разогрева бетона (прогрева) в основном диапазоне 30...50 °С приняли по результатам исследований малоэнергоемкой технологии для производства сборных бетонных и железобетонных изделий [2–6], после перепроверки этих данных на образцах-балочках (40х40х160 мм) из цементно-песчаного раствора стандартизированного состава и режима паропрогрева.

Отслеживали кинетику роста прочности образцов (150х150х150 мм) бетона на сжатие при твердении в формах, имитирующих опалубки разных типов ($K_m = 0,6...3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) (таблица 1), на воздухе с температурой от -5°С до -20°С. Составы бетона (таблица 2) соответствовали классам по прочности на сжатие и консистенции бетонных смесей общего диапазона, используемого в монолитном строительстве.

Таблица 1 – Характеристики форм-опалубок

Материал форм-опалубок и крышек	Коэффициент (расчетный) теплопередачи стенок форм (крышек) при скорости ветра 0 м/с, Вт/(м ² ·°С)
1. Доска, 25 мм	2,44
2. Металл (сталь), 10 мм	3,50
3. Металл (10 мм) + 60 мм минераловатная плита	~ 1,00
4. Фанера (12 мм) + 60 мм минераловатная плита	~2,98 / ~ 0,60* (*с утеплением)

Таблица 2 – Составы бетона для исследований

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

ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА С НАЧАЛЬНЫМ РАЗОГРЕВОМ ПРИ НИЗКОЙ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ И ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ ВОЗДУХА

Методика исследований кинетики роста прочности тяжелого конструкционного бетона с начальным разогревом базировалась на данных предыдущего этапа работы с мелкозернистым бетоном, которые, в свою очередь, получены на принципах малоэнергоемкой технологии для изготовления сборных изделий [2–6].

Разогрев бетона осуществляли электродным методом при сквозном прогреве перед установкой форм в камеру твердения. Для этого во всех формах (№ 1 и № 4 по таблице 1) две противоположные стенки имели два металлических пластинчатых электрода (стальная пластина толщиной 2 мм) с выходом в виде стержней Ø 6 мм, выступающих из сверлений в крышке формы (№ 1) и ее теплоизоляции (формы № 4) и служивших для подключения проводов подвода электрического тока с помощью быстротвердеющих медных зажимов.

В таблице 3 приведены полученные расчетные значения $P_{под}$, $P_{бет}$, $P_{оп}$, $P_{атм}$ и $P_{уд}$, соответственно: требуемая суммарная мощность для подъема температуры; мощность для подъема температуры бетона; опалубки (с крышкой); восполнения теплопотерь в атмосферу (в нашем случае разогрев вели в помещении при $t_{на} \sim 18...20^{\circ}\text{C}$) и усредненная мощность: $P_{уд} \sim 0,8 \text{ кВт/м}^3$, соответствующая тепловыделению цемента и учитываемая со знаком минус.

Таблица 3 – Значения мощности для разогрева в расчете на 1 м³ бетона

Температура разогрева бетона, °C	Номер формы по таблице 1	Расчетные значения мощности на стадии разогрева бетона, кВт/м ³				
		$P_{бет}$	$P_{оп}$	$P_{атм}$	$P_{уд}$	$P_{уд}$
30	1	0,7	2,45	0,975	-0,8	4,125
	4		1,366	0,24		2,306
40	1	0,7	2,45	1,95	-0,8	4,7
	4		1,366	0,46		2,526
50	1	0,7	2,45	2,926	-0,8	6,076
	4		1,366	0,72		2,786

Приведенные данные получены для разогрева бетона до температуры 30...50°C при начальной температуре бетонной смеси ~ 15°C и температуре воздуха в помещении лаборатории ~ 18...20°C. Во всех случаях удельная мощность превышает мощность, требуемую на стадии подъема температуры бетона, т. е. соблюдается условие: $P_{уд} \leq P_{уд}$.

Разогретые образцы в формах с крышками (конструктивно они соответствовали конструкции стенок) хранили в неотапливаемом помещении (для $t_{\text{вн}} \sim 5^{\circ}\text{C}$ и 0°C) либо помещали в морозильную камеру, отрегулированную на заданный уровень температуры в -5 , -10 и -20°C . После выдержки в этих условиях расчетный период твердения на образцах с датчиками-термопарами вначале замеряли температуру бетона к концу режима, а затем всю серию образцов распалубливали и испытывали на сжатие или оставляли дозревать до 28 сут. в нормально-влажностных условиях.

В экспериментах использовали бетон составов, приведенных в таблице 2. Данные, отражающие зависимость кинетики роста прочности бетона с добавкой «УКД-1» при различной температуре начального разогрева, температуре среды твердения, степени теплоизоляции форм (опалубки; №1 – доска 25 мм; №4 – фанера, утепленная минеральной ватой толщиной 60 мм) и модуля поверхности при твердении образцов в условиях термоса (без дополнительного подвода тепла), приведены в таблице 4. Данные по прочности бетона получены как единичные значения серий из 2-х образцов, разница значений которых не превышала 5...7% от меньшего.

Таблица 4 – Кинетика роста прочности бетона с начальным разогревом и твердением в условиях термоса

Температура разогрева бетона, $^{\circ}\text{C}$	Характеристики бетона			Номер формы по таблице 1	Прочность бетона в % от $f_{cm, 28}$ после термостатической выдержки, час				Температура бетона образцов через 24 ч твердения
	номер состава по таблице 2	класс бетона	Наличие и вид добавки		12	18	24	через 28 сут. твердения в камере с НВР ^а	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А. Температура наружного воздуха: $t_{\text{вн}} \sim 5^{\circ}\text{C}$									
30	1	$\text{C}^{12/15}$	–	1	26	35	42	101	19
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	1	42	55	63	104	23
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	1	46	53	65	–	–
30	1	$\text{C}^{12/15}$	–	4	25	39	44	101	21
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	4	63	72	80	106	29
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	4	65	71	82	105	–
50	1	$\text{C}^{12/15}$	–	1	35	45	55	103	–
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	1	55	66	74	105	24
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	1	55	68	77	108	–
Б. Температура наружного воздуха: $t_{\text{вн}} \sim 0^{\circ}\text{C}$									
30	1	$\text{C}^{12/15}$	–	1	26	33	39	98	–
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	1	40	49	56	106	15
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	1	44	50	61	104	–
30	1	$\text{C}^{12/15}$	–	4	22	31	39	105	19
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	4	56	63	76	104	26
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	4	58	65	77	108	–
50	1	$\text{C}^{12/15}$	–	1	34	46	52	103	–
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	1	49	65	74	102	20
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	1	53	66	75	104	–
В. Температура в камере хранения: -5°C									
30	1	$\text{C}^{12/15}$	–	4	22	31	36	98	–
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	4	48	58	60	110	18
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	4	49	57	62	113	–
40	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	4	56	64	75	–	25
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	4	57	66	75	–	–
50	1	$\text{C}^{12/15}$	–	4	34	39	48	102	–
	5	$\text{C}^{12/15}$	«УКД-1»	4	72	80	84	106	31
	7	$\text{C}^{25/30}$	«УКД-1»	4	73	81	86	108	–

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
50	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	1	40	46	52	—	12
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	1	42	46	54	—	
Г. Температура в камере хранения: -10°C									
30	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4	43	52	58	107	15
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4	44	51	58	111	
40	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4	52	63	71	—	22
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4	54	66	70	—	
50	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4	68	76	80	107	28
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4	71	76	82	109	
Д. Температура в камере хранения: -20°C									
30	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4	40	44	50	110	13
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4	40	46	50	110	
40	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4	48	55	63	—	16
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4	50	55	63	—	
50	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4	59	66	73	105	22
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4	60	66	75	108	
Е. Температура в камере хранения: -20°C , модуль поверхности блока образцов $M_n \sim 18 \text{ м}^{-1}$									
30	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4**	53	63	65	108	21
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4**	54	61	68	109	
50	5	$C^{12/15}$	«УКД-1»	4**	75	84	95	105	37
	7	$C^{25/30}$	«УКД-1»	4**	78	85	98	106	

Примечания: в камере с нормально-влажностным режимом твердения: 1 – формы из доски $\delta = 25 \text{ мм}$; 4 – формы из фанеры $\delta = 12 \text{ мм}$, утепленные минватой; 4** – блок-форма из фанеры, под общим колпаком при $K_f \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Анализ полученных экспериментальных данных (таблица 4) позволяет сделать следующие выводы.

Неутепленная опалубка (данные, относящиеся к форме №1) нерациональна к использованию при реализации малоэнергоемкой технологии в зимний период работ. Темп роста прочности бетона резко снижается при отсутствии теплоизоляции и повышении коэффициента теплопередачи опалубки (№1 – $K_m = 2,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ и форма №4, $K_m = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$), что соответственно увеличивает потери тепла в окружающую среду. Вместе с тем и в этом случае прочность бетона с добавками 1% «УКД-1», разогретого до температуры 50°C , через 18...24 ч «термосного» твердения достигает 65...75% от проектной в диапазоне температуры среды твердения вплоть до $t_{\text{нв}} \sim -5...-20^{\circ}\text{C}$ при модуле поверхности $M_n \sim 40...18 \text{ м}^{-1}$ соответственно. То есть обеспечивается условие не только бездефектной распалубки вертикальных и наклонных элементов зданий и сооружений, но и несущая способность этих конструкций, позволяющая вести дальнейшие работы с их использованием в качестве несущих.

При использовании утепленных типов опалубок, даже при устройстве тонкостенных конструкций с модулем теплоотдающей поверхности до $M_n \sim 40 \text{ м}^{-1}$, добавка «УКД-1» в сочетании с разогревом бетона до 50°C обеспечивают достижение им прочности до 75...95% в пределах 24 ч твердения при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = (-5...-20)^{\circ}\text{C}$. Это свидетельствует целесообразности и необходимости использования в зимний период теплоизолированных опалубок, что обеспечивает эффективную реализацию малоэнергоемкой технологии бетонирования.

Влияние повышения температуры начального разогрева бетона закономерно проявляется в повышении темпа роста его прочности во всех исследованных случаях, при прочих равных условиях. Таким образом, при необходимости, возможно компенсировать недостаточную теп-

лоизоляцию используемых опалубок, даже при изготовлении тонкостенных конструкций с большим модулем теплоотдающей поверхности.

ТВЕРДЕНИЕ БЕТОНА, ПОДВЕРГНУТОГО ОХЛАЖДЕНИЮ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ (-15...-17)°С, С ПОСЛЕДУЮЩИМ КРАТКОВРЕМЕННЫМ ПРОГРЕВОМ

В экспериментах использовали бетон составов 1 и 5, приведенных в таблице 2.

С целью изучения влияния комплексной пластифицирующе-ускоряющей добавки на прочность бетона при замерзании бетонной смеси до начала тепловой обработки, проводили следующие эксперименты.

Свежеприготовленную бетонную смесь охлаждали в течение 1 часа в морозильной камере при температуре (-15...-17)°С. Затем изготавливали образцы бетона (размерами 100x100x100 мм) в металлических формах с укладкой вибрированием ($A \sim 0,5$ мм; $f \sim 50$ Гц) в течение 3...5 с. Часть образцов подвергали прогреву в течение 1 часа при температуре 40°С. Также формовали образцы обоих составов бетонной смеси до ее замораживания.

Таким образом, образцы твердели в различных условиях, а именно:

- в нормально-влажностных условиях;
- с прогревом 1 час при $t = 40$ °С и дальнейшим твердением в нормально-влажностных условиях.

В возрасте 1, 3, 7 и 28 суток определяли прочностные свойства бетонов по методике согласно ГОСТ 10180-90. По результатам кратковременных испытаний бетона на сжатие определяли прочностные характеристики бетона. Данные экспериментальных исследований кинетики твердения бетона по росту его прочности на сжатие, выраженной в процентах от проектной (в возрасте 28 суток), при твердении образцов без подвода тепла, представлены на рисунке.

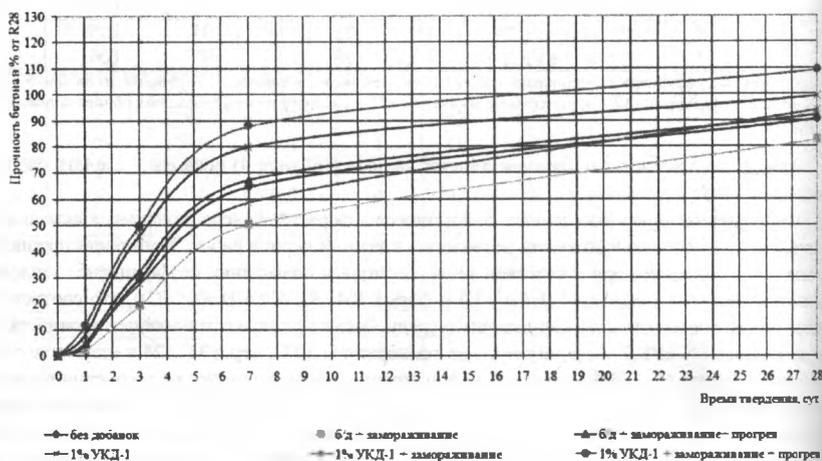


Рисунок 1 – Кинетика роста прочности бетона в течение 28 суток твердения в естественных условиях

Очевидно, что использование комплексной добавки «УКД-1» обеспечивает стабильный рост прочности бетона. При этом эффективность комплексной добавки несколько ниже в первые 24...48 часов твердения, что обусловлено эффектом торможения реакций гидратации цемента органической составляющей добавки С-3, ее поверхностно-активными веществами. Он явно выражен при пониженной температуре бетонной смеси и среды твердения. По этой же причине бетон без добавки не набрал проектную прочность. В то время как бетон с добавкой «УКД-1» без прогрева достиг 99% проектной прочности, а в результате прогрева и термостного выдерживания к 28 суткам твердения дал прирост прочности, равный 10%.

Оценивая эффективность применения модифицированного бетона для обеспечения энергооберегающей технологии зимнего монолитного бетонирования по данным исследования приходим к выводу, что бетон с комплексной добавкой «УКД-1» обеспечивает прочность в 80–90% от про-