

КИНЕТИКА ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА С ДОБАВКОЙ «УКД-1» В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ ТВЕРДЕНИЯ РАБОТ

¹МАРКО О. Ю., ²БАТЯНОВСКИЙ Э. И.

¹Белорусско-Российский университет
Могилев, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

Введение. Добавка «УКД-1» – новый вариант комплексной добавки в бетон, отличающийся тем, что кроме ускоряющего и пластифицирующего компонентов содержит в своем составе тонкодисперсный структурированный углеродный наноматериал. В настоящих исследованиях решалась задача оценки эффективности ее применения в монолитном бетоне, твердеющем по методу «горячего» термоса при пониженной положительной (+5 °С; 0 °С) и отрицательной температуре наружного воздуха (–5 °С; –10 °С; –20 °С). Эксперименты проводили на образцах базового (кубы с ребром 150 мм) размера при различающихся коэффициентах теплопередачи форм ($K_T \sim 0,6\text{--}3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°С})$, при $V_B = 0$, м/с). Режимы твердения включали электродный разогрев до температуры 30 °С; 40 °С; 50 °С и последующее термостатирование без подвода энергии (основной режим) и с кратковременной изотермией (1–4 ч) в ряде случаев.

Результаты экспериментов свидетельствуют о высокой степени эффективности добавки «УКД-1» с позиций ускорения темпа роста прочности бетона при одновременном снижении энергетических затрат на его прогрев. Последнее обеспечивается тем, что для набора прочности бетона в 70–80 % от проектного значения достаточно разогрева его до $t \sim 40\text{--}50 \text{ °С}$ с последующим твердением по методу «термоса» в течение 18–24 ч, в основном в зависимости от типа

(коэффициента теплопередачи) опалубки при температуре наружного воздуха до $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Методика и результаты исследований. Методика исследований кинетики роста прочности тяжелого конструкционного бетона с начальным разогревом базировалась на принципах малоэнергоёмкой технологии для изготовления сборных изделий [1–6].

Отличительной особенностью (которую было необходимо экспериментально проверить) монолитного бетонирования с использованием прогрева бетона является то, что теплота подводится (наиболее широко применяемым электродным прогревом, обогревом греющими проводами, либо индукционным методом) к бетону «изнутри», а не извне, как при тепловых обработках сборных изделий. То есть, в этом случае тепловой поток распространяется непосредственно в «теле» (объеме) бетона, без перепада температур между теплоносителем и бетоном (бортоснасткой), как это имеет место в заводском производстве. В этом случае контроль температурного режима разогрева и последующего твердения бетона в разных внешних условиях (материал форм (опалубок), степень теплоизоляции, температура наружного воздуха и др.) осуществляли по изменению ее значений в объеме бетона. Одновременно (естественно – дискретно) оценивали изменения прочности (на сжатие) контрольных образцов бетона.

Добавку «УКД–1» вводили в бетон в наиболее рациональном количестве – 1 % от МЦ [7]; уровень температуры разогрева (и последующего прогрева – при необходимости) бетона соответствовал практикуемому в строительстве: $30\text{--}50\text{ }^{\circ}\text{C}$; принят плавный подъем температуры при разогреве бетона со скоростью $\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{час}$.

Разогрев бетона осуществляли электродным методом при сквозном прогреве перед установкой форм в камеру твердения. Для этого во всех формах две противоположные стенки имели два металлических пластинчатых электрода (стальная пластина толщиной 2 мм) с выходом в виде стержней $\varnothing 6$ мм, выступавших из сверлений в крышке форм (№ 1), либо из ее теплоизоляции и служивших для подключения проводов подводки электрического тока с помощью быстроразъемных медных зажимов.

Электроток подводили от понижающего трансформатора, используя две фазы. Напряжение составляло $U = 36\text{ В}$, сила тока – $I \sim 100\text{ А}$. Уровень напряжения принят по условиям безопасного

ведения работ на основании расчета необходимой удельной мощности на подъеме температуры и мощности, обеспечиваемой при данном напряжении принятой схемой компоновки пластинчатых электродов, т. е. для расстояния между ними $\epsilon = 0,15$ м, $P_{уд} = 7,2$ кВт/м³. В табл. 1 приведены полученные расчетные значения $P_{под}$, $P_{бет}$, $P_{оп}$, $P_{атм}$ и $P_{экз}$, соответственно: требуемая суммарная мощность для подъема температуры; мощность для подъема температуры бетона; опалубки (с крышкой); восполнения теплотерь в атмосферу (в нашем случае разогрев вели в помещении при $t_{не} \sim 18-20^\circ\text{C}$) и усредненная мощность: $P_{экз} \sim 0,8$ кВт/м³, соответствующая тепловыделению цемента и учитываемая со знаком минус.

Таблица 1

Значения мощности для разогрева в расчете на 1 м³ бетона

Температура разогрева бетона, °C	Вид формы	Расчетные значения мощности на стадии разогрева бетона, кВт/м ³				
		$P_{бет}$	$P_{оп}$	$P_{атм}$	$P_{экз}$	$P_{под}$
30	Доска, 25 мм	0,7	2,45	0,975	-0,8	4,125
	Фанера, 12 мм		1,366	0,24		2,306
40	Доска, 25 мм	0,7	2,45	1,95	-0,8	4,7
	Фанера, 12 мм		1,366	0,46		2,526
50	Доска, 25 мм	0,7	2,45	2,926	-0,8	6,076
	Фанера, 12 мм		1,366	0,72		2,786

Приведенные данные получены для разогрева бетона в формах из деревянной доски 25 мм, расчетная средняя плотность 700 кг/м³, теплоемкость $C_y \sim 2,52$ кДж/(кг · °C), без утепления ($K_T \sim 2,44$ Вт/(м² · °C)) и для форм из фанеры 12 мм, расчетная средняя плотность 600 кг/м³, теплоемкость $C_f \sim 2,52$ кДж/(кг · °C) ($K_T \sim 2,98$ Вт/(м² · °C)) и с утеплением слоем в 60 мм минеральной ваты ($K_T \sim 0,6$ Вт/(м² · °C)) до температуры 30–50°С при начальной температуре бетонной смеси $\sim 15^\circ\text{C}$ и температуре воздуха в помещении лаборатории $\sim 18-20^\circ\text{C}$. Во всех случаях удельная мощность превышает мощность, требуемую на стадии подъема температуры бетона, т. е. соблюдается условие: $P_{под} \leq P_{уд}$.

На начальной стадии экспериментов с целью контроля в последующем темпа роста температуры, отследили ее изменение в геометрическом центре образцов (150×150×150 мм) с помощью датчиков-термопар, зафиксированных в «теле» бетона. В результате в дальнейшем бетон в образцах разогревали при периодическом включении подачи тока через 10 мин на 5–10 мин. В целом разогрев бетона до температуры 30, 40 и 50 °С осуществляли за 1,5, 2,5 и 3,5 часа соответственно. Одновременно на разогреве находилось до 12 форм с образцами.

Разогретые образцы в формах с крышками (конструктивно они соответствовали конструкции стенок), хранили в неотапливаемом помещении (для $t_{ис}$ ~ 5 °С и 0 °С) либо помещали в морозильную камеру, отрегулированную на заданный уровень температуры в –5, –10 и –20 °С. После выдержки в этих условиях расчетный период твердения на образцах с датчиками-термопарами вначале измеряли 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, соответствующим классам, приведенным в табл. 2, с добавкой 1 % «УКД-1». Эти составы характеризуются одинаковой консистенцией (ОК ~ 12–14 см), примерно равным содержанием цемента (340–345 кг на 1 м³ бетона). Использовали цементы марок М400 и М500 II группы эффективности (исходя из того, что цементы I группы заведомо обеспечат результаты не ниже полученных). С другой стороны, бетоны классов по прочности $C^{12/15}$ – $C^{25/30}$ наиболее массово применяют в строительстве. Поэтому информация о кинетике его твердения в зимних условиях имеет основополагающее значение для выработки соответствующих рекомендаций по режимам энергосберегающей технологии ведения бетонных работ.

Твердение бетона по методу «горячего» термоса. Данные, отражающие зависимость кинетики роста прочности бетона с добавкой «УКД-1» при различной температуре начального разогрева, температуре среды твердения, степени теплоизоляции форм и модуля поверхности при твердении образцов в условиях термоса (без дополнительного подвода тепла), приведены в табл. 2. Результаты испытаний в разделах табл. 2 – А, Б, В, Г и Д получены для образцов кубов размерами 150×150×150 мм, твердевших в индивидуальных

формах (модуль поверхности $M_n = 40 \text{ м}^2$), а раздела Е – для бетона из 12 форм, составленных в 2 ряда по высоте и ширине ($M_n \sim 18 \text{ м}^2$), в общем на весь блок из форм № 4 (фанера) теплоизолирующем кожухе. Коэффициент теплопередачи конструкции кожуха: $K_m \approx 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$, при $V_g = 0 \text{ м}/\text{с}$. Данные по прочности бетона получены как единичные значения серий из 2-х образцов, разница значений которых не превышала 5–7 % от меньшего.

Таблица 2

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

Температура разогрева бетона, $^\circ\text{С}$	Характеристики бетона		К _т формы, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{С})$ при $V_b = 0 \text{ м}/\text{с}$	Прочность бетона в % от $f_{cm, 28}$ после термостатической выдержки, час				Температура бетона образцов через 24 ч твердения
	Класс бетона	Наличие и вид добавки		12	18	24	через 28 суток твердения в камере с НВР*	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А. Температура наружного воздуха: $t_{на} \sim 5 \text{ }^\circ\text{С}$								
30	$\text{С}^{12/15}$	–	2,44	26	35	42	101	19
	$\text{С}^{12/15}$	«УКД–1»	2,44	42	55	63	104	23
	$\text{С}^{25/30}$	«УКД–1»	2,44	46	53	65	–	–
30	$\text{С}^{12/15}$	–	0,6	27	39	50	101	21
	$\text{С}^{12/15}$	«УКД–1»	0,6	63	72	80	106	29
	$\text{С}^{25/30}$	«УКД–1»	0,6	65	71	82	105	–
50	$\text{С}^{12/15}$	–	2,44	35	45	55	103	24
	$\text{С}^{12/15}$	«УКД–1»	2,44	55	66	74	105	
	$\text{С}^{25/30}$	«УКД–1»	2,44	55	68	77	108	
Б. Температура наружного воздуха: $t_{на} \sim 0 \text{ }^\circ\text{С}$								
30	$\text{С}^{12/15}$	–	2,44	26	33	39	98	15
	$\text{С}^{12/15}$	«УКД–1»	2,44	40	49	56	106	
	$\text{С}^{25/30}$	«УКД–1»	2,44	44	50	61	104	
50	$\text{С}^{12/15}$	–	2,44	34	46	52	103	20
	$\text{С}^{12/15}$	«УКД–1»	2,44	49	65	74	102	
	$\text{С}^{25/30}$	«УКД–1»	2,44	53	66	75	104	

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
В. Температура в камере хранения: -5°C								
30	$\text{C}^{12}/_{15}$	–	0,6	22	31	36	98	18
	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	48	58	60	110	
40	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	49	57	62	113	25
	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	56	64	75	–	
50	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	57	66	75	–	31
	$\text{C}^{12}/_{15}$	–	0,6	34	49	56	102	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	72	80	84	106	16
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	73	81	86	108	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	2,44	40	46	52	100	16
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	2,44	42	46	54	105	
Г. Температура в камере хранения: -10°C								
30	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	43	52	58	107	15
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	44	54	61	111	
40	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	52	63	71	106	22
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	54	66	70	106	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	68	76	80	107	28
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	71	76	82	109	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	2,44	41	44	50	103	15
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	2,44	43	44	51	105	
Д. Температура в камере хранения: -20°C								
30	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	38	44	50	110	13
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	39	46	50	110	
40	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	48	55	63	105	16
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	50	55	63	110	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	59	66	73	105	22
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	60	66	75	108	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	2,44	39	43	47	104	13
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	2,44	41	43	49	109	
Е. Температура в камере хранения: -20°C, модуль поверхности блока образцов $M_{\Pi} \sim 18 \text{ м}^{-1}$								
30	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	53	63	65	108	21
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	54	61	68	109	
50	$\text{C}^{12}/_{15}$	«УКД–1»	0,6	75	84	95	105	37
	$\text{C}^{25}/_{30}$	«УКД–1»	0,6	78	85	98	106	

Примечания: в камере с нормально-влажностным режимом твердения: « $K_T = 2,44$ » – формы из доски $\delta = 25 \text{ мм}$; « $K_T = 2,98$ » – формы из фанеры $\delta = 12 \text{ мм}$; при $K_T \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ – блок-форма из фанеры, под общим теплоизолирующим колпаком, а также из фанеры $\delta = 12 \text{ мм}$, утепленная минватой.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать следующие выводы.

Неутепленная опалубка 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 (сравнение при $K_m = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и $K_m = 2,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$), из-за увеличения потери тепла в окружающую среду. Вместе с тем и в этом случае прочность бетона с добавками 1 % «УКД-1», разогретого до температуры $50 \text{ }^\circ\text{C}$, через 18–24 ч «термосного» твердения достигает 65–75 % от проектной в диапазоне температуры среды твердения вплоть до $t_{\text{нв}} \sim -5 \dots -20 \text{ }^\circ\text{C}$ при модуле поверхности $M_n \sim 40\text{--}18 \text{ м}^{-1}$ 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 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ обеспечивают достижение им прочности до 75–90 % в пределах 24 ч твердения при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -5 \dots -20 \text{ }^\circ\text{C}$. Это свидетельствует о целесообразности и необходимости использования в зимний период теплоизолированных опалубок, что обеспечивает эффективную реализацию малоэнергоемкой технологии бетонирования.

Изменение (уменьшение) модуля теплоотдающей поверхности (при соответствующем уменьшении теплопотерь в окружающую среду) закономерно влияет на «среднюю» температуру твердеющего бетона, а в результате этого – и на темп роста его прочности. То есть, с понижением модуля поверхности возрастает средняя за период твердения в опалубке (в наших экспериментах – до 24 ч) температура бетона, что и способствует росту его прочности. Эта закономерность имеет также прямую связь с теплозащитной способностью опалубки, или обратной с ее коэффициентом теплопередачи.

Например, конечная (через 24 ч твердения при $t = -5 \text{ }^\circ\text{C}$) температура бетона при разогреве смеси до $50 \text{ }^\circ\text{C}$ для форм с « $K_m = 0,6$ » и « $K_m = 2,44$ » составила $31 \text{ }^\circ\text{C}$ и $16 \text{ }^\circ\text{C}$ соответственно, а уровень прочности бетона $\approx 85 \text{ } \%$ и $\approx 53 \text{ } \%$. Понижение модуля теплоотдающей поверхности от $M_n = 40 \text{ м}^{-1}$ (раздел Д) до $M_n = 18 \text{ м}^{-1}$ (раздел Е)

способствовало повышению средней температуры твердения разогретого до 50 °С бетона через 24 ч твердения до ~ 37°С (форм с « $K_m = 0,6$ ») и обеспечило рост прочности бетона с добавкой «УКД-1» от ~ 65–70 % до ~ 95–98 %.

Влияние повышения температуры начального разогрева бетона закономерно проявляется в темпе роста его прочности во всех исследованных случаях, при прочих равных условиях. Таким образом, при необходимости, возможно компенсировать недостаточную теплоизоляцию используемых опалубок, даже при изготовлении тонкостенных конструкций с большим модулем теплоотдающей поверхности.

Следует отметить, что повышение температуры разогрева бетона с добавкой, способствуя более высокому темпу роста его прочности в начальный период, отражается закономерным понижением ее в проектном возрасте. В данных экспериментах отмеченное явление прослеживается как тенденция, разница в значениях прочности к 28-суточному возрасту невелика, но она есть и (в исследованных пределах до 30–50°С) с повышением температуры эта разница возрастает. Необходимо отметить, что она в большей степени будет возрастать при использовании цементов I группы эффективности.

Кроме того, с ростом температуры разогрева увеличиваются и энергетические затраты, что снижает эффективность технологии. Поэтому, более целесообразно реализовать разогрев до минимально необходимой температуры бетона с добавкой, но использовать при этом утепленные типы опалубок. По физической сути явлений, обеспечивающих ускоренное твердения бетона, важна не столько температура начального разогрева, сколько ее уровень за период твердения, т. е. значение средней температуры в процессе твердения, что подтверждается данными табл. 2.

Твердение бетона с начальным разогревом и кратковременным прогревом. Учитывая часто возникающую производственную необходимость использования неутепленных типов опалубок при работе в зимний период исследовали кинетику роста прочности бетона при режимах кратковременного электродного прогрева, включавшего подъем температуры до 30–50°С (соответственно, для бетона на цементе I, II и III групп эффективности при пропаривании) и поддержание ее на заданном уровне в течение 1–4 ч. Дальнейшее твердение бетона – медленное

остывание в форме-опалубке (доска толщиной 25 мм), при температуре $t_{нв} = -10$ °С.

Во всех сопоставимых случаях (см. таблицу 3) подвод тепла к бетону осуществляли равные отрезки времени: 4,5 и 5,5 ч. При этом, если время разогрева бетона увеличивалось (с ростом температуры разогрева), то сокращали продолжительность изотермии. Таким образом обеспечивали равный период времени последующего «термостного» твердения бетона: 12; 18 и 24 ч, для получения большей сопоставимости результатов экспериментов.

В исследованиях использовали бетон класса $C^{12}/_{15}$ (цемент марки 400; I группа эффективности – БЦЗ; II – Красносельскстрой-материалы и III – Кричевцементношифер); подвижность смеси ОК ~ ~ 12–14 см, составы с добавкой 1 % «УКД–1».

Таблица 3

Кинетика роста прочности бетона с кратковременным прогревом (твердение в деревянных формах-опалубке при $t_{нв} = -10$ °С)

Температура прогрева бетона	Режим подвода тепла (ч): нагрев + изотермический прогрев	Группа эффективности цемента при пропаривании (М400)	Вид добавки	Прочность бетона в % от $f_{cm,28}$ после твердения в течение (ч) от начала изотермического прогрева		
				12	18	24
1	2	3	4	5	6	7
30	1,5+3	1	«УКД–1»	65	76	78
	1,5+4	1	«УКД–1»	71	80	86
40	2,5+2	2	«УКД–1»	63	72	75
	2,5+3	2	«УКД–1»	69	78	84
50	3,5+1	3	«УКД–1»	61	71	77
	3,5+2	3	«УКД–1»	70	77	84
50	3,5+1	1	«УКД–1»	80	89	93

Из полученных данных следует, что используя добавку «УКД–1», в сочетании с кратковременным прогревом бетона при подаче тепла в течение 4,5–5,5 ч, даже в неутепленной деревянной

опалубке возможна реализация малоэнергоёмкой технологии. Отметим, что с меньшей эффективностью, чем в теплоизолированных типах опалубок, из-за необходимости изотермического прогресса в течение 1–4 ч.

При этом за период твердения в 16,5–17,5 ч и 22,5–24,0 ч (включая подъем температуры, прогрев бетона и «термостатическую» выдержку 12 и 18 ч) образцы бетона с добавками ($M_n = 40 \text{ м}^{-1}$) достигает прочности, соответственно, до 70 % и до 80 % от проектной. Увеличение времени твердения до 28–30 ч позволяет при этих условиях обеспечить прочность бетона до 85 %.

Подтверждена зависимость прочности бетона с добавкой от группы эффективности используемого цемента и температуры разогрева (прогрева) бетона. Принятый по полученным данным уровень температуры прогрева – 30, 40 и 50 °С, для цемента I, II и III групп эффективности, обеспечивает примерное равенство прочности бетона за равные периоды твердения, при прочих равных условиях.

Из этого следует, что наименьшие энергетические затраты на стадии твердения бетона с прогревом обеспечивает применение цемента I-й группы эффективности, характеризующегося наибольшим тепловыделением (экзотермией). Кроме изложенного, при использовании неутепленной опалубки и ускоренной потере, в связи с этим, тепла твердеющего бетона рационально увеличение температуры разогрева до 50 °С, что в совокупности с активным (I-й группы) вяжущим обеспечивает за 16–24 ч твердения уровень прочности в 80–90 % от проектной.

Следует отметить, что наиболее интенсивно прочность разогретого бетона, твердеющего в неутепленной опалубке, нарастает в первые 12–18 ч, а затем темп ее роста снижается. Это непосредственно связано с теплопотерями в окружающую среду. В результате выделяющаяся теплота экзотермии цемента не накапливается, а расходуется на поддержание температуры твердеющего бетона. При неутепленной опалубке через 16–18 ч твердения потери тепла начинают превалировать (как в рассматриваемом случае), а температура твердеющего бетона существенно снижается, что отражается потерей темпа роста его прочности. Изложенное иллюстрируется графическими закономерностями (рисунка) изменений температуры бетона в процессе прогрева (подъема температуры) до заданного уровня (в данном случае до $t_p = 50 \text{ °С}$) и последующего «термостатического» выдерживания (естественного

остывания бетона образцов в форме-опалубке) без дополнительного подвода энергии (тока) при температуре наружного воздуха: $t_{н.в.} \sim (-10)^\circ\text{C}$, и модуле поверхности: $M_n = 40 \text{ м}^{-1}$.

Обработка результатов экспериментов представлена в виде табл. 4, в которой приведены рекомендуемые режимы твердения бетона с добавкой «УКД-1» в теплоизолированной опалубке ($K_m = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) при скорости ветра $0 \text{ м}/\text{с}$) для модулей теплоотдающей поверхности до $M_n \leq 40 \text{ м}^{-1}$, при скорости подъема температуры до $10^\circ\text{C}/\text{ч}$.

Полученные при выполнении настоящих исследований данные о кинетике твердения цементного бетона с добавкой «УКД-1» при кратковременном низкотемпературном разогреве позволяют сформулировать основные правила ведения бетонных работ на принципах малоэнергоемкой технологии для монолитного строительства.

Таблица 4

Режимы твердения бетона с добавкой «УКД-1»
по «малоэнергоемкой» технологии (для цемента II группы
эффективности при пропаривании)

Температура разогрева бетона, $^\circ\text{C}$	Вид добавки	Время подъема температуры (ч) при $V_n=10^\circ\text{C}/\text{ч}$	Время термостатической выдержки в опалубке в зависимости от $t_{нв} (^\circ\text{C})$ при обеспечении прочности в %-х от проектной (100 %):											
			$t_{нв} = -5^\circ\text{C}$				$t_{нв} = -10^\circ\text{C}$				$t_{нв} = -20^\circ\text{C}$			
			50	60	70	80	50	60	70	80	50	60	70	80
30	«УКД-1»	$\leq 2,5$	16	24	32	42	18	26	38	*	24	36	*	*
40	«УКД-1»	$\leq 3,5$	10	16	20	30	12	16	22	30	12	20	28	40
50	«УКД-1»	$\leq 4,5$	8	10	12	18	10	11	12	24	10	12	20	28

* Не рекомендуется.

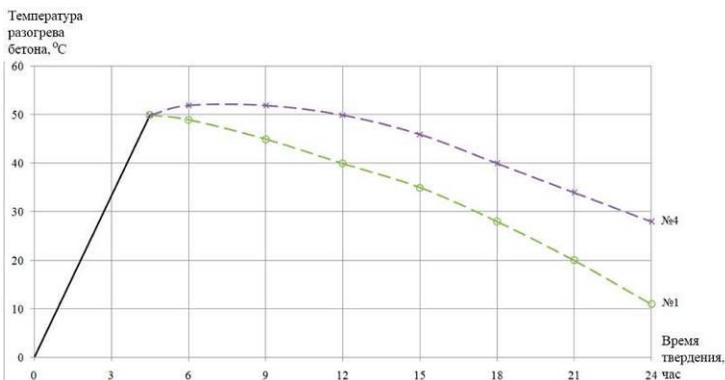


Рис. 1. Изменение температуры разогретого бетона:

- 1 – в форме из деревянной доски (25 мм без дополнительного утепления);
 2 – из фанеры (12 мм) с теплоизоляцией

Выводы. Экспериментально исследована кинетика роста прочности первоначально разогретого и твердевшего затем без подвода тепла бетона с добавкой «УКД–1» для зимнего периода ведения бетонных работ в диапазоне низкой положительной температуры – 0–5 °С, и минусовой температуры наружного воздуха в диапазоне (–5...–20) °С для опалубки с палубой из фанеры ($K_T \sim 2,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$) (и ее утепленного варианта ($K_T \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$)) и из деревянной доски ($K_T \sim 2,44, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$). Установлено, что:

- при использовании утепленных типов опалубки бетон с 1 % «УКД–1» разогретый до 50 °С с последующим твердением по методу «термоса» – в течение 18–24 часов достигает прочности в 75–90 % от проектной при $t_{не} = -5...-20 \text{ °C}$ и модуле поверхности $M_n \leq 40$ и $\leq 18, \text{ м}^{-1}$, соответственно; в опалубках без утеплителя с палубой из фанеры ($\delta = 12 \text{ мм}$) и доски ($\delta = 25 \text{ мм}$) прочность в указанных условиях достигла до 60–65 % от проектной;

- температура начального разогрева может быть понижена до 30–40 °С с обеспечением 60–70 % прочности бетона в утепленной опалубке и гидро-теплоизоляцией неопалубленных ей через 24 ч твердения по методу «термоса» при $t_{не}$ до –10 °С; и с обеспечением 50–60% прочности при понижении температуры до –20 °С;

- понижение модуля теплоизолирующей поверхности (в экспериментах с $M_n \sim 18 \text{ м}^{-1}$) закономерно способствовало повышению средней температуры твердеющего при прочих равных условиях

бетона, что обеспечило к 24 ч твердения в условиях «термоса» рост прочности бетона с добавкой «УКД-1» от 70–76 % до 95–98 %;

– энергосберегающая технология с начальным разогревом бетона при последующем твердении без подвода тепла (по методу «термоса») может быть реализована в рядовых фанерных (деревянных) опалубках, но при условии повышения температуры разогрева до ≥ 50 °С, а значит – с большими затратами энергии на этот процесс.

Экспериментально подтверждено, что используя добавку «УКД-1» в сочетании с кратковременным изотермическим прогревом (в течение 1–4 ч) бетона возможна реализация малоэнергоемкой технологии в неутепленных типах опалубки (палуба из фанеры, деревянной доски). Так, за период твердения до 24 ч (включая подъем температуры, изотермический прогрев бетона на цементе II группы эффективности при $t \sim 30$ –50 °С и последующее остывание конструкции в опалубке 12–18 ч) возможно обеспечить прочность до 70–80 % от проектной, с выдержкой бетона в опалубке до 30–36 ч – до 80–90 %, что создает все необходимые предпосылки для эффективной реализации энергосберегающей (малоэнергоемкой) технологии зимнего бетонирования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Батяновский Э.И., Осос Р.Ф. Технологические особенности производства ЖБК с применением ускорителей твердения бетона // Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительство зданий и сооружений: Сб. ст. / Под ред. Н.П. Блещика, Э.И. Батяновского. – Брест: БПИ, 1998. – Вып. 1. – С. 22–25.

2. Парфенова, Л.М. Перспективы применения химических добавок в малоэнергоемких технологиях возведения бетонных и железобетонных конструкций // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров в Республике Беларусь: Материалы V Международного научно-технического семинара (Минск, 17–20 октября 2000 г.) / Под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Минск: УП «Технопринт», 2000. – С. 84–88.

3. Батяновский Э.И., Лихачевский А.Я., Осос Р.Ф. Энергосберегающая технология бетона // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: Материалы

докладов Международной научно-технической конференции (Минск, 25–26 мая 2005 г.). – Минск: БГТУ, 2005. – С. 146–148.

4. Батяновский Э.И., Иванова Е.И., Осос Р.Ф. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона // Научно-технический журнал «Строительная наука и техника». – Минск: 2006. – № 3(6). – С. 7–17.

5. Марцинкевич В.Л., Дыдышко А.С. Энергосберегающие технологии производства бетона. – Минск: 2006. – 283 с.

6. Протьюко Н.С. Беспрогревная и малоэнергоемкая технология производства бетонных и железобетонных изделий с применением полиметаллического водного концентрата: Автореферат диссертации канд. техн. наук: 05.23.05 / Белорусская государственная политехническая академия. – Минск: 2001. – 20 с.

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