

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

Батяновский Эдуард Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой, УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск (Беларусь)

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

Eduard Batyanovsky, DSc in Engineering Science Professor, head of the department, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА С КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКОЙ «УКД-1»

ENERGY-SAVING TECHNOLOGY OF THE IN-SITU CONCRETE WITH COMPLEX ADDITIVE «UKD-1»

АННОТАЦИЯ

В настоящих исследованиях, основные результаты которых изложены в материале статьи, решалась задача ускорения темпа роста прочности бетона в технологии монолитного бетонирования и снижения энергетических затрат при прогревах бетона. В частности, были разработаны энергосберегающие режимы его твердения, включая ведение работ в зимний период за счет введения в состав комплексной добавки «УКД-1», содержащей традиционный ускоритель твердения и повышающий прочность бетона компонент (в виде отечественного структурированного углеродного наноматериала) в рациональном сочетании с пластифицирующим компонентом. Ее использование способствует понижению температуры и сокращению времени подвода энергии (тепла) при прогревах бетона, одновременно обеспечивая высокий темп роста его прочности и ее уровень в проектном (28 суток) и более позднем возрасте. С использованием стандартных и оригинальных методик экспериментально

показано, что даже при ведении бетонных работ в указанный период (при температуре воздуха до «-20 °C»), задача по обеспечению прочности бетона на уровне 70...90 % от проектной может быть решена применением режимов с кратковременным (2,5...4 часа) разогревом бетона с добавкой «УКД-1» до температуры 40...50 °C с последующим «термосным» выдерживанием конструкции в утепленной опалубке в течение 20...40 часов, а для неутепленных опалубок (с палубой из фанеры или деревянной доски) – применением режимов с разогревом бетона (с добавкой «УКД-1») до указанной температуры и кратковременного (1...4 часа) изотермического прогрева при последующем выдерживанием конструкции в опалубке (медленном остывании с опалубкой) в течение до 24 часов.

ABSTRACT

In the present study, which main results are represented in this article, the problem of the growth rate acceleration of the concrete strength in the technology of monolithic concrete and the problem of energy costs reduction for the concrete heating are solved. In particular, the energy-efficient modes of its hardening were developed including maintenance works in the winter period due to the introduction of the complex additive «UKD-1», that contains a traditional hardening accelerator and one more component that increases the concrete strength (in the form of domestic structured carbon nanomaterial) in the rational combination with a plasticizing component. This technology contributes to the temperature decrease and to the time reduction of the energy supply (heat) for the concrete heating, at the same time it provides a high growth rate of the concrete strength and its level in the project (28 days) and later. Using standard and original techniques it was demonstrated experimentally that even when maintenance concrete works are implemented in this period (at the air temperature up to «-20 °C»), the problem of providing of the concrete strength at the level of 70...90% of the project aim can be solved using modes of short (2.5...4 h) heating of the concrete with the complex additive «UKD-1» to the temperature of 40...50 °C followed by the «thermal» sustaining of the structure in the warmed formwork for 20...40 hours, if the framework is not warmed

(plywood or wooden planks formworks), modes of concrete heating (with the complex additive «UKD-1») until the specified temperature and shot (1...4 h) isothermal warming-up are to be used followed by the sustaining of the structure in the formwork (slowly cooling formwork) for up to 24 h.

Ключевые слова: комплексная химическая добавка, сульфат натрия, углеродный наноматериал, цемент, бетон, ускорение твердения.

Keywords: complex chemical additive, sodium sulfate, carbon nanomaterial, cement, concrete, hardening acceleration.

ВВЕДЕНИЕ

При круглогодичном ведении бетонных работ в монолитном строительстве нашей республики реализуются два базовых варианта твердения бетона. В летний период (традиционно с апреля-мая по сентябрь-октябрь) – естественное твердение бетона, и с ноября по март (иногда и апрель) – твердение с различными вариантами прогрева (нагрева, обогрева) бетона строительных конструкций. 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 несущих конструкций ранее возведенных этажей требует ускоренного роста его прочности (вплоть до проектной).

Традиционные технологии бетонирования с разными вариантами прогрева (нагрева, обогрева) бетона (с учетом специфики зимнего периода работ) характеризуются значительной продолжительностью твердения бетона до набора требуемой прочности, т.к. температура прогрева преимущественно не превышает (40...50) °С, и большими затратами энергии, достигающими 150...200 кВт·ч на 1 м³ бетона [1, 5, 8, 12, 13].

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 [7] на стандартизированном составе бетона (цемента (М500 Д0; Красносельскстройматериалы) – 350 кг; ШЦ = 1100 кг; П = 750 кг; В = 175 кг; подвижность смеси: ОК ~ (3...4) см) и твердении образцов (100 × 100 × 100 мм) в нормально-влажностных ($\varphi \geq 90\%$; $t \sim 20$ °С) 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. Во всех случаях придерживались принципа равноподвижности бетонных смесей, поэтому в основных составах с «УКД-1» водосодержание $(В/Ц)_6$ было ниже.

С целью повышения темпа строительства из монолитного бетона прогревы несущих конструкций начинают и заканчивают при низких положительных температурах (октябрь и апрель месяцы года) и, что естественно, осуществляют при работе в зимний период. В этой связи диапазон температур наружной среды ($t_{\text{не}},$ °С) для исследований кинетики твердения (роста прочности) бетона с добавкой «УКД-1» по варианту малоэнергоёмкой технологии был принят в диапазоне температуры 5...(-20 °С. Температуру разогрева бетона (прогрева) в основном диапазоне 30...50 °С приняли по результатам исследований малоэнергоёмкой технологии для производства сборных бетонных и железобетонных изделий [2–4, 9–11, 14], после перепроверки этих данных на образцах-балочках (160 × 160 × 40 мм) из цементно-песчаного раствора стандартизированного состава и режима паропрогрева [16].

Отслеживали кинетику роста прочности образцов бетона на сжатие при твердении в формах, имитирующих опалубки разных типов ($K_m = 0,6 \dots 3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$) (табл. 1), на воздухе с температурой от -5 °C до -20 °C . Составы бетона (табл. 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 ·°C)
Доска, 25 мм	2,44
Металл (сталь), 10 мм	3,50
Металл (10 мм) + 60 мм минераловатная плита	~ 1,00
Фанера (12 мм) + 60 мм минераловатная плита	~2,98 / ~ 0,60*

* С утеплением

Основным режимом тепловой интенсификации твердения бетона был электродный разогрев до заданной температуры и последующее твердение по методу термоса. Поверхность бетона гидроизолировали полиэтиленовой пленкой и термоизолировали прижимной крышкой из материала формы при одинаковом коэффициенте теплопередачи.

Условия твердения бетона при температуре воздушной среды в диапазоне $t_{\text{нв}} = -5 \dots -20 \text{ °C}$ обеспечивали, помещая образцы в формах (опалубке) в климатологическую камеру-морозильник, отрегулированную на соответствующей конкретному эксперименту температурный режим.

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

ПРОЧНОСТЬ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА ПОСЛЕ ПАРПРОГРЕВА

Отличие состава мелкозернистого бетона от «стандартизированного» цементно-песчаного раствора заключалось в использовании многофракционного песка (песок природный, среднезернистый с $M_k = 2,45$, средней насыпной плотностью $\rho_{II}^0 = 1550 \text{ кг/м}^3$, плотностью зерен $\rho_{II}^3 = 2650 \text{ кг/м}^3$), который затем применяли при приготовлении тяжелого бетона с крупным заполнителем. В таблице 3 представлены результаты экспериментов по выявлению закономерностей влияния добавки «УКД-1» на твердение мелкозернистого бетона при паропрогреве по стандартному

режиму (выдержка – 2 ч; подъем температуры до 80 ± 5 °С – 3 ч; изотермический прогрев – 6 ч; остывание в пропарочном бачке – 2 ч) при испытании образцов-балочек в возрасте 23...24 ч на изгиб и сжатие [6] и варианту малоэнергоёмкой технологии, т.е. при разогреве бетона и дальнейшим твердением без подвода тепла в условиях «термоса».

Учитывая целевое назначение настоящей работы, режим прогрева изменяли по величине температуры и продолжительности ее подъема. После выхода температуры на требуемый уровень подачу энергии прекращали. В ряде случаев бачок, в котором вели прогрев образцов, теплоизолировали специальным кожухом, создавая таким образом условия твердения «горячего термоса».

Из данных таблицы 3 следует, что с введением в состав бетона добавки «УКД-1» при пропаривании прочность возрастает. Эффект основывается на ускорении процессов гидролиза-гидратации и твердения цемента за счет ускоряющих компонентов добавки и роста плотности структуры за счет снижения водосодержания мелкозернистого бетона. В частности, при равноподвижности смесей, из которых изготавливали образцы-балочки, водоцементное отношение состава без добавки равнялось: $V/C = 0,44$, а с 1% «УКД-1» – $V/C = 0,37...0,38$, т.е. начальное водосодержание ниже на ~ 20%.

Полученные данные свидетельствуют об эффективности режима прогрева, включающего кратковременный тепловой импульс, путем нагрева образцов до 40...60 °С, с последующим термосным твердением бетона с добавкой «УКД-1».

Очевидно, что введение добавки «УКД-1» эффективно для всех видов использованных вяжущих. Со снижением их активности (№ 4) для повышения темпа роста и уровня прочности бетона после прогрева необходим начальный разогрев до более высокой температуры.

В целом, результаты эксперимента свидетельствуют, что введение добавки «УКД-1» повышает темп роста прочности цемента, обеспечивает при кратковременном (за 2...3 ч) нагреве до температуры 40...60 °С и последующем твердении по методу термоса (16...17 ч) прочность мелкозернистого бетона стандартизированного состава и консистенции в 70...90% от номинальной марки

вяжущего, что подтверждает наличие необходимых условий для разработки малоэнергоёмкой технологии бетонных работ с ее применением.

Таблица 3

Влияние добавки «УКД-1» на прочность мелкозернистого бетона при паропрогреве

Группа эффективности цемента	Наличие добавки в составе бетона	Режим прогрева			Прочность образцов к 24 ч, МПа		Прочность к 24 ч, %
		подъем температуры, ч (°С)	изотермический прогрев, ч	остывание вместе с бачком, ч	на изгиб	на сжатие	
1; 1-я	без добавки	3 (80)	6	2	4,9	34,8	100
1; 1-я	1% «УКД-1»	3 (80)	6	2	5,6	42,8	123
3; 2-я	без добавки	3	6	2	4,7	31,3	90
1; 1-я	1% «УКД-1»	2 (40)	термос	17	6,1	43,0	124
1; 1-я	1% «УКД-1»	3 (60)	термос	17	6,4	46,1	132
3; 2-я	1% «УКД-1»	2 (60)	термос	16	6,2	46,2	133
4; 3-я	1% «УКД-1»	3 (60)	термос	16	5,3	41,3	119
4; 3-я	1% «УКД-1»	2 (40)	термос	17	5,7	32,0	92

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 малоэнергоёмкой технологии для изготовления сборных изделий [2–4, 9–11, 14].

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; уровень температуры разогрева (и последующего прогрева – при необходимости) бетона соответствовал практикуемому в строительстве: 30...50 °С; принят плавный подъем температуры при разогреве бетона со скоростью ~ 10 °С/час.

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, выступавших из сверлений в крышке формы (№ 1) и ее теплоизоляции (формы № 4) и служивших для подключения проводов подводки электрического тока с помощью быстросъемных медных зажимов.

Электроток подводили от понижающего трансформатора, используя 2 фазы. Напряжение тока составляло $U = 36$ В, сила тока – $I 100$ 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 $b = 0,15$ м, $P_{уд} = 7,2$ кВт/м³.

В таблице 4 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 теплопотерь в атмосферу (в нашем случае разогрев вели в помещении при $t_{нв} \sim 18...20$ °С) и усредненная мощность: $P_{экз} \sim 0,8$ кВт/м³, соответствующая тепловыделению цемента и учитываемая со знаком минус.

Таблица 4

Значения мощности для разогрева в расчете на 1 м³ бетона

Температура разогрева бетона, °С	Номер формы по таблице 1	Расчетные значения мощности на стадии разогрева бетона, кВт/м ³ :				
		$P_{бет}$	$P_{оп}$	$P_{атм}$	$P_{экз}$	$P_{под}$
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 в формах (№ 1 – деревянная доска 25 мм, расчетная средняя плотность 700 кг/м³, теплоемкость $C_y \sim 2,52$ кДж/(кг · °С), без утепления и для формы № 4 – фанера 12 мм, расчетная средняя плотность 600 кг/м³, теплоемкость $C_f \sim 2,52$ кДж/(кг · °С), с утеплением слоем в 60 мм минеральной ваты) до температуры 30...50 °С при начальной температуре бетонной смеси ~ 15 °С и температуре воздуха в помещении лаборатории $\sim 18...20$ °С. 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 $t_{\text{нв}} \sim 5 \text{ °С}$ и 0 °С) либо помещали в морозильную камеру, отрегулированную на заданный уровень температуры в -5 , -10 и -20 °С . После выдержки в этих условиях в течение расчетного периода 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 созревать до 28 суток в нормально-влажностных условиях.

В экспериментах использовали бетон составов, приведенных в таблице 2, с добавкой 1% «УКД-1». Эти составы характеризуются одинаковой консистенцией (ОК $\sim 12...14 \text{ см}$), примерно равным содержанием цемента (340...345 кг на 1 м^3 бетона), но различаются значениями водоцементного отношения и относительного водосодержания (№ 1, № 5 и № 7, соответственно, В/Ц = 0,53 и X = 1,6; 0,48 и 1,32; 0,42 и 1,2). Из предыдущих экспериментов следует, что это наиболее важные (при прочих равных условиях) факторы, влияющие на кинетику твердения бетона. Для этих экспериментов 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.

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) и модуля поверхности при твердении образцов в условиях термоса (без дополнительного подвода тепла), приведены в таблице 5. Результаты испытаний в разделах таблицы 4–А, Б, В, Г и Д получены

для образцов кубов размерами $150 \times 150 \times 150$ 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 теплоизолирующем кожухе из форм № 4 (фанера). 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 5

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

Температура разогрева бетона, $^\circ\text{С}$	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 суток твердения в камере с НВР*	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
А. Температура наружного воздуха: $t_{нв} \sim 5^\circ\text{С}$									
30	1	$C^{12}/_{15}$	–	1	26	35	42	101	19
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	1	42	55	63	104	23
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	1	46	53	65	–	–
30	1	$C^{12}/_{15}$	–	4	25	39	44	101	21
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	4	63	72	80	106	29
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	4	65	71	82	105	–
50	1	$C^{12}/_{15}$	–	1	35	45	55	103	24
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	1	55	66	74	105	
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	1	55	68	77	108	
Б. Температура наружного воздуха: $t_{нв} \sim 0^\circ\text{С}$									
30	1	$C^{12}/_{15}$	–	1	26	33	39	98	15
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	1	40	49	56	106	
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	1	44	50	61	104	
30	1	$C^{12}/_{15}$	–	4	22	31	39	105	19
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	4	56	63	76	104	26
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	4	58	65	77	108	–
50	1	$C^{12}/_{15}$	–	1	34	46	52	103	20
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	1	49	65	74	102	
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	1	53	66	75	104	

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
В. Температура в камере хранения: –5 °С									
30	1	$C^{12}/_{15}$	–	4	22	31	36	98	18
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	4	48	58	60	110	
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	4	49	57	62	113	
40	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	4	56	64	75	–	25
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	4	57	66	75	–	
50	1	$C^{12}/_{15}$	–	4	34	39	48	102	31
	5	$C^{12}/_{15}$	«УКД-1»	4	72	80	84	106	
	7	$C^{25}/_{30}$	«УКД-1»	4	73	81	86	108	
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 °С									
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 °С									
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 °С, модуль поверхности блока образцов M_n ~ 18 м¹									
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 $\delta = 25$ мм; 4 – формы из фанеры $\delta = 12$ мм, утепленные минватой; 4** – блок-форма из фанеры, под общим колпаком при $K_T \sim 0,6$ Вт/(м²·°С).

Анализ полученных экспериментальных данных (табл. 5) позволяет сделать следующие выводы.

Неутепленная опалубка (данные, относящиеся к форме № 1) не рациональна 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 – $K_m = 2,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$ и форма № 4, $K_m = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$), 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 $t_{\text{нв}} \sim -5...-20 \text{ °C}$ 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 $t_{\text{нв}} = -5...-20 \text{ °C}$. Это свидетельство 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 температуру твердевшего 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 обратную с ее коэффициентом теплопередачи.

Например, конечная (через 24 ч твердения при $t = -5 \text{ °C}$) температура бетона (состав № 5) при разогреве смеси до 50 °C для

форм № 4 и № 1 составила 31 °С и 12 °С соответственно, а уровень прочности бетона $\approx 85\%$ и $\approx 53\%$. Оцениваемая средним арифметическим температура твердения бетона в формах № 4 и № 1 равнялась $t_{cp}^{N^{\circ}4} \sim 40\text{ °С}$ и $t_{cp}^{N^{\circ}1} \sim 31\text{ °С}$. 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 (состав № 5) за 24 ч до $\sim 43\text{ °С}$ (для форм № 4) и обеспечило рост прочности бетона с добавкой «УКД-1» от $\sim 70\text{...}75\%$ до $\sim 95\text{...}98\%$.

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 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 проектный возраст. 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 цемента I группы.

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 твердение бетона, важна не столько температура начального разогрева, сколько ее уровень за период твердения, т. е. значение средней температуры в процессе твердения, что подтверждается данными таблицы 5.

РЕЖИМЫ ТВЕРДЕНИЯ 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 (№ 1 по таблице 5.1, доска толщиной 25 мм), при температуре $t_{нв} = -10$ °С.

Во всех сопоставимых случаях (табл. 6) 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 «термосного» твердения бетона: 12; 18 и 24 ч, для получения большей сопоставимости результатов экспериментов.

В исследованиях использовали бетон класса C¹²/₁₅ (цемент марки 400; I группа эффективности – БЦЗ; II – Красносельск-стройматериалы и III – Кричевцементношифер), подвижность смеси ОК ~ 12...14 см, составы с добавкой 1% «УКД-1» (№ 5, по таблице 2).

Из полученных данных (табл. 6) 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 малоэнергоемкой технологии, хотя и с меньшей эффективностью, чем в теплоизолированных типах опалубок, из-за необходимости изотермического прогрева в течение 1...4 ч.

При этом за период твердения в 16,5...17,5 ч и 22,5...23,5 ч (включая подъем температуры, прогрев бетона и «термостатическую» выдержку 12 и 18 ч) образцы бетона с добавками ($M_n = 40$ м⁻¹) достигают прочности, соответственно, до 70%

и до 80% от проектной. Увеличение времени твердения до 28,5...29,5 ч позволяет при этих условиях обеспечить прочность бетона до 85%.

Таблица 6

Кинетика роста прочности бетона с кратковременным прогревом (твердение в деревянных формах-опалубке при $t_{нв} = -10^{\circ}\text{C}$)

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
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

Подтверждена зависимость прочности бетона с добавкой от группы эффективности используемого цемента и температуры разогрева (прогрева) бетона, ранее выявленная и обоснованная в данных работы. Принятый по этим 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 1-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°C , что в совокупности с активным (1-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 (рис. 1) изменений температуры бетона в процессе прогрева (подъема температуры) до заданного уровня (в данном случае до $t_p = 50^{\circ}\text{C}$) 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: $M_n = 40 \text{ м}^{-1}$.

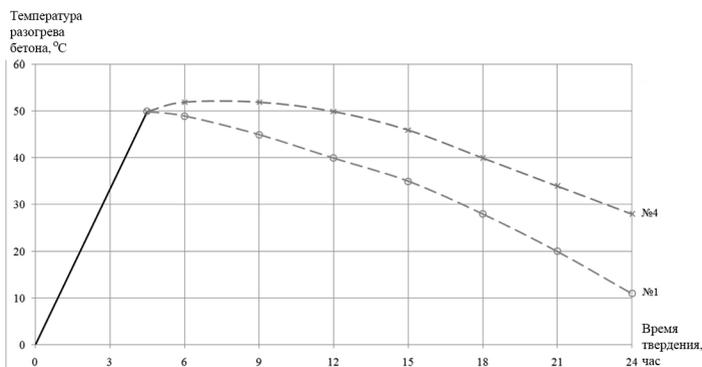


Рисунок 1. Изменение температуры разогретого бетона в форме № 1 (без дополнительного утепления) и № 4 (с теплоизоляцией)

Обработка результатов экспериментов представлена в виде таблицы 7, в которой приведены рекомендуемые режимы твердения бетона с добавкой «УКД-1» в теплоизолированной опалубке ($K_m = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{°C})$) при скорости ветра 0 м/с) для модулей теплоотдающей поверхности до $M_n \leq 40 \text{ м}^{-1}$, при скорости подъема температуры до $10 \text{ °C}/\text{ч}$.

Полученные при выполнении настоящих исследований данные о кинетике твердения цементного бетона с добавкой «УКД-1» при кратковременном низкотемпературном разогреве дополняют результаты исследований для диапазона температур $5 \dots 30 \text{ °C}$, что позволяет сформулировать основные правила ведения бетонных работ на принципах беспрогревной и малоэнергоемкой технологий для монолитного строительства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально подтверждено, что при использовании добавки «УКД-1» в сочетании с кратковременным изотермическим прогревом (в течение $1 \dots 4 \text{ ч}$) 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 $t \sim (30 \dots 50) \text{ °C}$ и последующее остывание конструкции в опалубке $12 \dots 18 \text{ ч}$) возможно обеспечить прочность до $70 \dots 80 \%$ от проектной, а с выдержкой бетона в опалубке до $30 \dots 36 \text{ ч}$ – до $80 \dots 90 \%$.

Экспериментально подтверждено, что сочетание высокоэффективных вяжущих с повышенным содержанием $C_3S + C_2A$ (I группы эффективности) и использования в бетоне добавки «УКД-1» обеспечивают уровень прочности бетона, твердеющего в неутепленных типах опалубки, до 90% от проектной за $16 \dots 24 \text{ ч}$ твердения, т. е. создают все необходимые предпосылки для эффективной реализации энергосберегающей (малоэнергоемкой) технологии зимнего бетонирования.

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

Температура разогрева бетона, °С	Вид добавки	Время подъема температуры (ч) при $V_n = 10^\circ\text{C}/\text{ч}$	Время термостатической выдержки в опалубке в зависимости от $t_{\text{нв}}$ (°С) при обеспечении прочности в %-ах от проектной (100 %):											
			$t_{\text{нв}} = -5^\circ\text{C}$				$t_{\text{нв}} = -10^\circ\text{C}$				$t_{\text{нв}} = -20^\circ\text{C}$			
			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

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Арбенъев, А. С. Зимнее бетонирование с электроразогревом смеси / А. С. Арбенъев. – М.: Стройиздат, 1970. – 103 с.
2. 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: БПИ, 1998. – Вып. 1. – С. 22–25.
3. Батяновский, Э. И. Энергосберегающая технология бетона / Э. И. Батяновский, А. Я. Лихачевский, Р. Ф. Осос // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития: Материалы докладов Международной научно-технической конференции (Минск, 25–26 мая 2005 г.) – Мн.: БГТУ, 2005. – С. 146–148.
4. Батяновский, Э. И. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона / Э. И. Батяновский, Е. И. Иванова, Р. Ф. Осос // Научно-технический журнал «Строительная наука и техника». – Мн.: 2006. – № 3(6). – С. 7–17.

5. Бессер, Я. Р. Методы зимнего бетонирования / Я. Р. Бессер. – М.: Стройиздат, 1976. – 168 с.
6. ГОСТ 310.4–81. Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии. – Введ. 1983–07–01. – М.: Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1983. – 17 с.
7. ГОСТ 30459–96. Добавки для бетонов. Методы определения эффективности. – Введ. 1998–07–01. – М.: НИИЖБ РФ, 1998. – 40 с.
8. Лысов, В. П. Эффективность бетонных работ в строительстве / В. П. Лысов. – Мн.: Беларусь, 1982. – 92 с.
9. Марцинкевич, В. Л. Энергосберегающие технологии производства бетона / В. Л. Марцинкевич, А. С. Дыдышко. – Мн.: 2006. – 283 с.
10. 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 Международного научно-технического семинара (Минск, 17–20 октября 2000 г.) / Под ред. Н. П. Блещика, А. А. Борисевича, Т. М. Пецоьлда. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. – С. 84–88.
11. Протько, 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 / Протько Наталья Сергеевна. – Мн.: 2001. – 20 с.
12. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – М.: Стройиздат, 1982. – 313 с.
13. Руководство по электротермообработке бетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 245 с.
14. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссор. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.

REFERENCES

1. Arbenyev A. S. *Zimnee betonirovanie s elektrorazogrevom smesi* [Winter concreting with electroheat-up of a compound]. Moscow: Stroyizdat, 1970. 103 p. (rus)
2. Batyanovsky E. I. *Tekhnologicheskie osobennosti proizvodstva ZhBK s primeneniem uskoriteley tverdeniya betona* [Technological features of production of SCC using concrete solidification accelerators] // Problemy tekhnologii proizvodstva stroitelnykh materialov, izdeliy i konstruktsiy, stroitelstvo zdaniy i sooruzheniy: Sb. st. / Pod red. N. P. Bleshchika, E. I. Batyanovskogo. Brest: BPI, 1998. No. 1. pp. 22–25. (rus)
3. Batyanovsky E. I., Leehachevskiy A. Ya., Osos R. F. *Energosbe regayushchaya tekhnologiya betona* [Energy-saving technology of the concrete] // Nauka i tekhnologiya stroitelnykh materialov: sostoyanie i perspektivy razvitiya: Materialy dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii (Minsk, 25–26 maya 2005 g.). Minsk: BGTU, 2005. pp. 146–148. (rus)
4. Batyanovsky E. I., Ivanova E. I., Osos R. F. *Stroitel'naya nauka i tekhnika*. 2006. No. 3(6). pp. 7–17. (rus)
5. Besser Ya. R. *Metody zimnego betonirovaniya* [Methods of a winter concreting]. Moscow: Stroyizdat, 1976. 168p. (rus)
6. GOST 310.4–81. *Tsementy. Metody opredeleniya predela prochnosti pri izgibe i szhatii* [Cements. Methods of bending and compression strength determination]. Moscow: Ministerstvo promyshlennosti stroitelnykh materialov SSSR, 1983. 17 p. (rus)
7. GOST 30459–96. *Dobavki dlya betonov. Metody opredeleniya effektivnosti* [Additives for concrete. Methods of determining the efficiency]. Moscow: NIIZhB RF, 1998. 40 p. (rus)
8. Lysov V. P. *Effektivnost betonnykh rabot v stroitelstve* [Efficiency of concrete operations in construction]. Minsk: Belarus, 1982. 92 p. (rus)
9. Martcinkevich V. I. *Energosberegayushchie tekhnologii proizvodstva betona* [Energy-saving production technologies of concrete]. Minsk, 2006. 283 p. (rus)

10. Parfenova L. M. *Perspektivy primeneniya himicheskikh dobavok v maloenergoemkikh tekhnologiyakh vozvedeniya betonnykh i zhelezobetonnykh konstruktciy* [Perspectives of application of chemical components in low-power-intensive technologies of exponentation of concrete and steel-concrete constructions] // *Perspektivy razvitiya novykh tekhnologiy v stroitelstve i podgotovke inzhenernykh kadrov v Respublike Belarus: Materialy VI Mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminaru* (Minsk, 17–20 oktyabrya 2000 g.). Minsk: UP «Tekhnoprint», 2000. pp. 84–88. (rus)
11. Protko N. S. *Besprogrevnaya i maloenergoemkaya tekhnologiya proizvodstva betonnykh i zhelezobetonnykh izdeliy s primeneniem polimetallicheskogo vodnogo koncentrata: Avtoreferat dissertatsii kand. tekhn. nauk: 05.23.05* [Technology without warming up and low-power-intensive production technology of concrete and steel-concrete products using a polymetallic water concentrate: Abstract of the thesis of Candidate of Technical Sciences: 05.23.05] / *Belorusskaya gosudarstvennaya politekhnicheskaya akademiya* / Protko Natalya Sergeevna. Minsk: 2001. 20 p. (rus)
12. *Rukovodstvo po proizvodstvu betonnykh rabot v zimnikh usloviyakh, rayonakh Dalnego Vostoka, Sibiri i Kraynego Severa* [Manual on production of concrete operations in the winter conditions, regions of the Far East, Siberia and Far Nort]. Moscow: Stroyizdat, 1982. 313 p. (rus)
13. *Rukovodstvo po elektrotermoobrabotke betona* [Manual on concrete electric heat-treatment]. Moscow: Stroyizdat, 1974. 245 p. (rus)
14. Sheykin A. E. Chehovskiy Yu. V., Brussor M. I. *Struktura i svoystva tsementnykh betonov* [Structure and properties of cement concrete]. Moscow: Stroyizdat, 1979. 344 p. (rus)

Статья поступила в редколлегию 01.09.2016