

МАЛОЭНЕРГОЕМКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОНОЛИТНОГО БЕТОНА С НАНОУГЛЕРОДНОЙ ДОБАВКОЙ «УКД-1»

Марко (Шейда) О. Ю., магистр техн. наук, ассистент (БРУ),
Батяновский Э. И., д-р техн. наук, профессор,
Орлович А.И., канд. техн. наук, доцент (БНТУ)

Аннотация. 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» (содержащей традиционный ускоритель твердения и повышающий прочность бетона компонент, в виде 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.

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 – твердение с разными вариантами прогрева (нагрева, обогрева) бетона строительных конструкций. При повышенном темпе строительства монолитных зданий (особенно высотных) бетон несущих конструкций обогревают, начиная с сентября месяца и заканчивая в апреле, т.к. в этом случае быстро нарастающая нагрузка на бетон ранее возведенных этажей требует ускоренного роста его прочности (вплоть до проектной).

Традиционные технологии зимнего бетонирования с разными вариантами прогрева (нагрева, обогрева) бетона характеризуются значительной продолжительностью его твердения до набора требуемой прочности, т.к. температура прогрева преимущественно не превышает (30...50) °С, и значительными затратами энергии, достигающими 150...200 кВт·ч на 1 м³ бетона [1-5].

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 принципах малоэнергоемкой технологии [6-11].

Добавку «УКД-1» вводили в бетон в ранее определенном 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 электрод-

ным методом при сквозном прогреве (пластинчатые электроды) перед установкой форм в камеру твердения.

Приведенные в таблице 1 данные получены для разогрева бетона (составов по таблице 1) в формах без утепления (№1 – деревянная доска 25 мм, расчетная средняя плотность 700 кг/м^3 , теплоемкость $C_y \sim 2,52 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$; коэффициент теплопередачи $K_T \sim 2,44 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ при скорости ветра $V_B = 0 \text{ м/с}$), и для форм № 2 – фанера 12 мм, расчетная средняя плотность 600 кг/м^3 , теплоемкость $C_f \sim 2,52 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{°C)}$, с утеплением слоем в 60 мм минеральной ваты (коэффициент теплопередачи $K_T \sim 0,60 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{°C)}$ при $V_B = 0 \text{ м/с}$) до температуры $30 \dots 50 \text{ °C}$ при начальной температуре бетонной смеси $\sim 15 \text{ °C}$. Во всех случаях удельная мощность превышала мощность, требуемую на стадии подъема температуры бетона, т.е. соблюдается условие: $P_{\text{под}} \leq P_{\text{уд}}$. Разогрев бетона до температуры 30, 40 и 50 °C осуществляли за 1,5; 2,5 и 3,5 часа соответственно.

Таблица 1 – Составы бетона для исследований

Номер состава бетона	Класс бетона	Подвижность бетонной смеси (ОК), см	Марка цемента	Расход составляющих (кг) на 1 м ³ бетона:				В/Ц	X.
				Ц	П	Щ	В		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
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

Разогретые образцы в формах с крышками (конструктивно в исследованиях соответствовали конструкции стенок), хранили в неотапливаемом помещении (для $t_{\text{не}} \sim 5 \text{ °C}$ 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 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.

Данные, отражающие зависимость кинетики роста прочности бетона с добавкой «УКД-1» при различной температуре начального разогрева, темпе-

ратуре среды твердения, степени теплоизоляции форм (№1 из доски 25 мм; №2 из фанеры, утепленной минеральной ватой) и модуля поверхности при твердении образцов в условиях термоса (без дополнительного подвода тепла), приведены в таблице 2. Результаты испытаний в разделах А, Б, В, Г и Д получены для образцов кубов размерами 150x150x150 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 ($M_n \sim 18 \text{ м}^2$) и помещенных в общий на весь блок из форм №2 (фанера) теплоизолирующий кожух. Коэффициент теплопередачи конструкции кожуха: $K_m \approx 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$, при $V_e = 0 \text{ м/с}$. Данные по прочности бетона получены как единичные значения серий из 2-х образцов, разница значений которых не превышала 5 % от меньшего; коэффициент вариации в сериях образцов одного класса по прочности в возрасте 28 сут не превышал 6 %.

Таблица 2 – Кинетика роста прочности бетона с начальным разогревом и твердением по принципу «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 суток твердения в камере с НВР*	
А. Температура наружного воздуха: $t_{нв} \sim 5^\circ\text{C}$									
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	–	2	25	39	44	101	21
	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	63	72	80	106	29
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	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: $t_{нв} \sim 0^\circ\text{C}$									
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	–	2	22	31	39	105	19
	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	56	63	76	104	26
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	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	

В. Температура в камере хранения: -5°С									
30	1	C ¹² / ₁₅	–	2	22	31	36	98	18
	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	48	58	60	110	
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	49	57	62	113	
40	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	56	64	75	–	25
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	57	66	75	–	
50	1	C ¹² / ₁₅	–	2	34	39	48	102	31
	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	72	80	84	106	
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	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»	2	43	52	58	107	15
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	44	51	58	111	
40	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	52	63	71	–	22
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	54	66	70	–	
50	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	68	76	80	107	28
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	71	76	82	109	
Д. Температура в камере хранения: -20°С									
30	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	40	44	50	110	13
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	40	46	50	110	
40	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	48	55	63	–	16
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	50	55	63	–	
50	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2	59	66	73	105	22
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2	60	66	75	108	
Е. Температура в камере хранения: -20°С, модуль поверхности блока образцов M _п ~ 18 м ⁻¹									
30	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2**	53	63	65	108	21
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2**	54	61	68	109	
50	5	C ¹² / ₁₅	«УКД-1»	2**	75	84	95	105	37
	7	C ²⁵ / ₃₀	«УКД-1»	2**	78	85	98	106	

Примечания: в камере с нормально-влажностным режимом твердения: №1 – формы из доски $\delta = 25$ мм; №2 – формы из фанеры $\delta = 12$ мм, утепленные минватой; 2** – блок форм из фанеры, под общим колпаком при $K_T \sim 0,6$ Вт/(м²·°С); $M_n \sim 18$ м⁻¹.

Анализ экспериментальных данных таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы. Неутепленная опалубка (данные, относящиеся к форме №1) нерациональна к использованию при работах в зимний период работ. Темп роста прочности бетона снижается при отсутствии теплоизоляции и повышении коэффициента теплопередачи опалубки (№1 – $K_m = 2,44$ Вт/(м²·°С), а для формы №2, $K_m = 0,6$ Вт/(м²·°С)), что, соответственно, увеличивает потери тепла в окружающую среду. Вместе с тем и в этом случае прочность бетона с добавкой 1% «УКД-1», разогретого до температуры 50 °С, через 18...24 ч «термосного» твердения достигает 65...75% от проектной в диапазоне температуры среды твердения вплоть до $t_{не} \sim -5...-20$ °С при модуле поверхности M_n

$\sim 40 \dots 18 \text{ м}^{-1}$ 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.

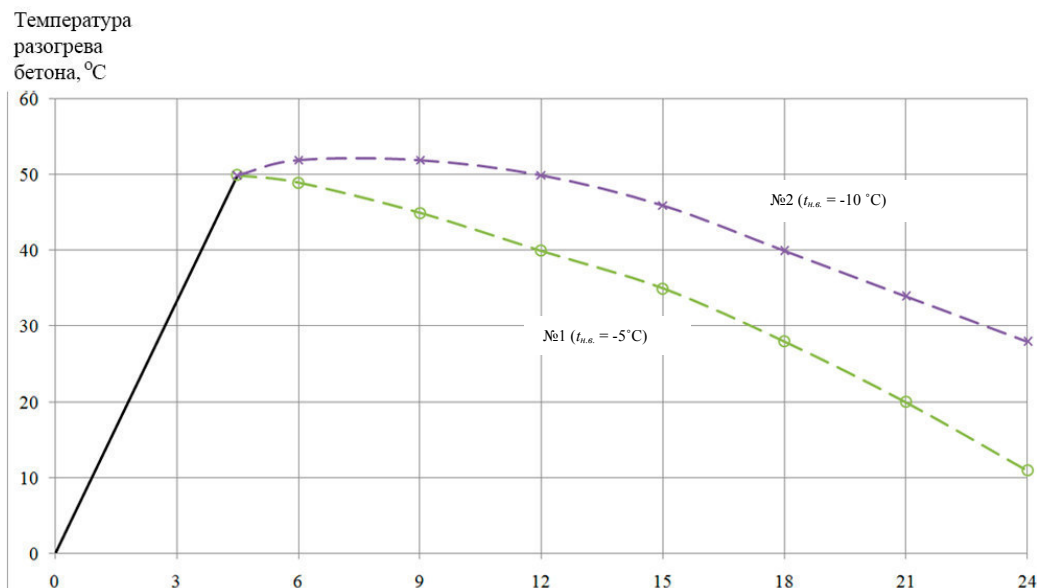
При использовании утепленных типов опалубок (даже при устройстве тонкостенных конструкций с модулем теплоотдающей поверхности до $M_n \sim 40 \text{ м}^{-1}$), добавка «УКД–1» в сочетании с разогревом бетона до 50 °C обеспечивают достижение им прочности до $75 \dots 95 \%$ в пределах 24 ч твердения при температуре наружного воздуха $t_{нв} = -5 \dots -20 \text{ °C}$. Это свидетельство целесообразности и необходимости использования в зимний период теплоизолированных опалубок, что обеспечивает эффективную реализацию малоэнергоёмкой 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 №2 и №1 составила 31 °C и 12 °C соответственно, а уровень прочности бетона $\approx 85 \%$ и $\approx 53 \%$. Оцениваемая средним арифметическим температура твердения бетона в формах №2 и №1 равнялась $t_{cp}^{\text{№4}} \sim 40 \text{ °C}$ и $t_{cp}^{\text{№1}} \sim 31 \text{ °C}$. 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 °C бетона (состав №5) за 24 ч до $\sim 43 \text{ °C}$ (для форм № 2) и обеспечило рост прочности бетона с добавкой «УКД–1» от $\sim 70 \dots 75 \%$ до $\sim 95 \dots 98 \%$.

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. Однако, 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 $30 \dots 50 \text{ °C}$) с повышением температуры эта разница возрастает. Необходимо отметить, что она в большей степени будет возрастать при использовании цементов 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 твердения бетона, важна не столько температура начального разогрева, сколько ее уровень за период твердения, т.е. значение средней температуры в процессе твердения, что подтверждается графическими зависимостями рисунка.



Изменение температуры разогретого бетона в форме №1 (без дополнительного утепления) и №2 (с теплоизоляцией)

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, так как выделяющаяся теплота экзотермии цемента не накапливается, а расходуется на поддержание температуры твердеющего бетона и «уходит» в окружающую среду. 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 (см. рисунок) изменений температуры бетона в процессе прогрева (подъема температуры) до заданного уровня (в данном случае до $t_p = 50$ °C) и последующего «термостатического» выдерживания (естественного остывания бетона образцов в форме-опалубке) без дополнительного подвода энергии (тока) при температуре наружного воздуха: $t_{н.в.} \sim (-5)$ °C для неутепленной опалубки и $t_{н.в.} \sim (-10)$ °C для утепленной, и при модуле поверхности: $M_n = 40$ м⁻¹.

Заключение. Экспериментально подтверждено, что используя добавку «УКД-1» в сочетании с кратковременным разогревом бетона при работе в зимний период возможна реализация малоэнергоёмкой технологии даже в неутепленных типах опалубки (палуба из фанеры, деревянной доски), хотя предпочтительно, естественно, опалубки с утеплением.

Экспериментально подтверждено, что сочетание высокоэффективных вяжущих с повышенным содержанием C_3S+C_3A (≥ 60 % массы вяжущего; 1 группы эффективности) и использования в бетоне добавки «УКД-1» обеспечивают уровень прочности бетона, твердеющего в неутепленных типах опалубки, до (80...85 %) от проектной за 16...24 ч твердения, т.е. создает необходимые предпосылки для реализации эффективной энергосберегающей (малоэнергоемкой) технологии зимнего бетонирования.

Однозначен высокий эффект применения в зимний период работ добавки «УКД-1» в бетон в сочетании с утепленными типами опалубок, обеспечивающий за 24 ч твердения уровень прочности до 90 % и более от проектной (28 сут).

Литература. Лысов В.П. Эффективность бетонных работ в строительстве. – Мн.: Беларусь, 1982, – 92 с. 2. Арбенев А.С. Зимнее бетонирование с электроразогревом смеси. – М.: Стройиздат, 1970. – 103 с. 3. Бессер Я.Р. Методы зимнего бетонирования. – М.: Стройиздат, 1976. – 168 с. 4. Руководство по электротермообработке бетона. – М.: Стройиздат, 1974. – 245 с. 5. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера. – М.: Стройиздат, 1982. – 313 с. 6. 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. 7. 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 VI Международного научно-технического семинара (Минск, 17-20 октября 2000 г.) / Под ред. Н.П. Блещика, А.А. Борисевича, Т.М. Пецольда. – Мн.: УП «Технопринт», 2000. – С. 84-88. 8. 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.) – Мн.: БГТУ, 2005. – С. 146-148. 9. Батяновский Э.И., Иванова Е.И., Осос Р.Ф. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона // Научно-технический журнал «Строительная наука и техника». – Мн.: 2006. – №3(6). – С. 7-17. 10. Марцинкевич В.Л., Дыдышко А.С. Энергосберегающие технологии производства бетона. – Мн.: 2006. – 283 с. 11. 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. – Мн. 2001. – 20 с.