

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ЦЕМЕНТНОГО БЕТОНА: ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ПРОБЛЕМЫ

Состояние вопроса. Нараставшие с началом девяностых годов XX века кризисные явления в энергообеспечении народного хозяйства Беларуси поставили перед его строительной отраслью задачу резкого снижения энергопотребления. Учитывая значительные объемы использования цементного бетона в современном строительстве и перспективность его применения как конструкционного материала в дальнейшем, особую значимость приобрела разработка энергосберегающих технологий в производстве сборных изделий и при устройстве (возведении) монолитных конструкций из бетона и железобетона. С 1994-95 г.г. такие технологии стали активно внедряться в строительной отрасли республики. Их можно условно разделить на два типа: "пассивные" или беспрогревные и "активные" или малоэнергоемкие.

При реализации беспрогревной технологии отсутствует подвод тепла к бетону от внешних искусственных источников, а ускорение его твердения (т.е. повышение темпа роста прочности) обеспечивают за счет применения соответствующих химических добавок и аккумуляции теплоты экзотермии цемента, а при возможности – используя тепловую солнечную энергию. Накопление теплоты в твердеющем бетоне сопровождается эффектом саморазогрева, что способствует ускорению процессов гидратации и твердения вяжущего, интенсифицирует рост прочности бетона.

Малоэнергоемкие технологии характеризуются наличием периода подъема температуры за счет подвода тепла к бетону от внешних источников с последующим твердением сборных изделий или монолитных конструкций в условиях естественного остывания вместе с тепловым агрегатом или опалубкой. По существу, это разновидность метода "горячего термоса", при которой необходимый температурный режим твердения бетона обеспечивают за счет начального его разогрева до температуры в $30...60^{\circ}\text{C}$, а в дальнейшем температура поддерживается благодаря теплоте экзотермии цемента.

Прямые энергетические затраты на ускорение твердения бетона при беспрогревной технологии отсутствуют. Ее эффективность при производстве сборных изделий оценивается по времени оборота форм и съему продукции за возможно более короткий период твердения бетона в бортоснастке, а также по продолжительности «дозревания» бетона до уровня отпускной прочности. В монолитном строительстве, кроме ускоренного оборота опалубки, эффективность беспрогревной технологии определяется обеспечиваемым темпом роста прочности бетона и возможностью продолжения бетонных работ либо ведения сопутствующих строительных работ.

Эффективность малоэнергоемкой технологии оценивается по энергетическим затратам на ее реализацию, которые должны быть минимальными и обеспечивать достижение расчетных показателей качества бетона (преимущественно – требуемого уровня прочности) при ускоренном обороте бортоснастки или опалубки.

Обеспечение высокого темпа роста прочности бетона при беспрогревной технологии и минимальных энергетических затрат на ускорение процесса его твердения при малоэнергоемкой технологии зависит от целого ряда факторов, а точнее – от их рационального сочетания: качества материалов для бетона (особенно – цемента), применения соответствующих цели химических добавок [1], технического состояния и теплоизоляции тепловых агрегатов и опалубок, уровня технологической дисциплины и контроля на всех этапах работ от приготовления бетонной смеси до контроля качества бетона.

Результаты исследований, выполненных на кафедре «Строительные материалы и изделия» БНТУ и ее научно-исследовательской лаборатории модифицированного бетона, а

также анализ опыта использования энергосберегающих технологий в строительной отрасли свидетельствуют, что в летний период по варианту беспрогревной технологии возможно за 16...24 ч твердения бетона достичь прочности на уровне до 50 % от проектной и таким образом обеспечить условия бездефектной распалубки не только монолитных конструкций, но и сборных изделий, армированных ненапрягаемой арматурой; за 40...48 ч твердения возможно достичь прочности бетона в 70...80 % от проектной, что обеспечивает требуемые условия распалубки сборных изделий с напрягаемой арматурой и снятия опалубки, например, с монолитных перекрытий зданий и сооружений.

Используя варианты малоэнергоемкой технологии возможно за 14...18 ч твердения бетона с начальным разогревом обеспечить его прочность на уровне 70...80 % от проектной с затратами тепловой энергии при изготовлении сборных изделий примерно 210000...300000 Дж (0,05...0,07 Гкал) на 1 м³ бетона, а при бетонировании монолитным способом, например, с использованием электродного прогрева, до 100000...150000 Дж (до 0,025...0,03 Гкал), в зависимости от условий ведения работ.

Приведенные данные подтверждены практикой использования беспрогревной технологии (например, завод ЖБИ № 7 г. Могилева) и ее малоэнергоемких вариантов (например, завод пустотных изделий ОАО «Минскжелезобетон» г. Минска) в производстве сборных изделий и при ведении бетонных работ монолитным способом (например, МПМК № 198 г. Логойска – фундаменты крытой автостоянки «Комаровского» рынка в г. Минске; ЗАО «Славянский строитель» - несущие внутренние стены и перекрытия 18-этажного монолитного здания в г. Санкт-Петербурге). Реализация энергосберегающих технологий с наибольшей эффективностью требует соблюдения ряда условий, связанных с выбором цемента, химических добавок, созданием температурного режима твердения бетона и разрешением других проблем. В ранее опубликованных материалах [2, 3] достаточно подробно рассмотрены особенности заводских технологий изготовления сборных железобетонных изделий. При ведении строительства с использованием энергосберегающих технологий монолитного бетона возникают некоторые дополнительные проблемы, связанные с необходимостью транспортирования бетона с введенными добавками [4], а также ведением работ при отрицательной температуре наружного воздуха и другие. В предлагаемом материале приведены результаты исследований, выполненных применительно к монолитному бетону с использованием отечественных добавок: ускорителя твердения сульфата натрия (Na₂SO₄ или «СН»), суперпластификатора «С-3» и комплексной добавки, включающей оба эти компонента.

Изменение формовочных свойств бетонной смеси. Оценивали снижение подвижности (ОК, см; материалы «стандартного» качества) бетонных смесей по ГОСТ 10181.1 без добавки и с добавками во времени при следующих изменяющихся факторах:

- начальной формуемости смеси и ее состава;
- начальной температуре смеси;
- температуре наружного воздуха;
- с периодическим перемешиваем смеси и без него.

В таблице 1 приведены исходные данные по составам и свойствам бетонных смесей и приготовленного из них бетона, которые использовались в исследованиях.

На рис. 1 (а) приведены данные о тенденции изменений формуемости бетонной смеси во времени в зависимости от состава бетона (цемент М400 и М500 2-ой группы эффективности), начальной консистенции смеси, наличия и вида добавки (СН – сульфат натрия, К – комплексная); при температуре смеси и окружающей среды ~ 18...22⁰С.

Из данных, относящихся к бетонной смеси без добавок (составы №№ 1, 2, 3, 4) следует, что формуемость их закономерно ухудшается с течением времени.

Характеристики бетонных смесей и бетона

№ п/п	Класс бетона	Формуемость бетонной смеси		Марка цемен- та	Расход составляющих (кг) на 1 м ³ бетона:				Водоцемент- ное отноше- ние бетона
		«Ж», см	«ОК», см		Ц	П	Ш	В	
А. Составы без добавок:									
1	C12/15	-	3...4	M400	275	735	1200	160	0,58
2	C12/15	-	12...14	M400	380	685	1090	201	0,53
3	C25/30	-	3...4	M500	385	615	1180	176	0,46
4	C25/30	-	12...14	M500	465	590	1095	208	0,45
Б. Составы с добавкой 1 % СН от МЦ									
5	C12/15	-	3...4	M400	261	730	1230	147	0,56
6	C12/15	-	12...14	M400	360	720	1100	182	0,50
7	C25/30	-	3...4	M500	364	670	1185	161	0,44
8	C25/30	-	12...14	M500	442	625	1100	195	0,44
В. Составы с комплексной добавкой «0,5 % С-3 + 0,5 % СН» от МЦ									
9	C12/15	-	3...4	M400	247	785	1220	130	0,52
10	C12/15	-	12...14	M400	340	715	1150	163	0,48
11	C12/15	-	21...23	M400	405	710	1065	180	0,44
12	C25/30	-	12...14	M500	345	715	1175	145	0,42
13	C25/30	-	21...23	M500	420	720	1065	175	0,41

Введение в бетонную смесь добавки СН (1% от массы цемента, далее – МЦ) незначительно сказывается на темпе снижения ее формуемости первые 45...60 мин от приготовления, а затем ухудшение формуемости смеси с этой добавкой начинает прогрессировать.

Влияние комплексной добавки (0,5 % С-3 + 0,5 % СН от МЦ) проявляется в снижении формуемости смеси примерно через 60...75 мин от момента приготовления.

Следует отметить, что с ростом начальной величины осадки конуса пластичных бетонных смесей абсолютные значения снижения этого показателя (за равный отрезок времени от момента приготовления смеси) возрастают. Так, если низкопластичная смесь (без добавок и с ними, №№ 1, 5, 9 по табл. 1) до 90...120 мин соответствует марке «П1», то литая (№№ 11, 13) за этот период переходит из марки «П5» в марку «П1». В последнем случае влияние оказывает и корректировка состава бетона, которая в рассматриваемых примерах сопровождалась снижением расхода цемента и водоцементного отношения на 10...15 % от начальных значений (при обеспечении равной прочности бетона (разделы Б и В табл. 1)).

На рис. 1(б) приведены данные о тенденции изменений формуемости бетонной смеси составов (по табл. 1) №№ 1, 5, 9 (низкопластичная смесь) и №№ 4, 8, 13 (пластичная и литая (по СТБ 1035-96)) под влиянием температуры наружного воздуха ($t_{нв}$). При этом температура бетонной смеси ($t_{см}$) соответствовала условию: $t_{см} = t_{нв}$, для температуры среды в 5...8⁰С; 12...15⁰С и 18...22⁰С; при $t_{нв} = 25...30^0$ С температура смеси начальная равнялась 18...20⁰С. В последнем случае объем пробы бетона на период ожидания в процессе эксперимента укрывали жестким паронепроницаемым колпаком.

Эти данные подтверждают прямую зависимость ухудшения формуемости бетонной смеси с добавками и без них при повышении температуры смеси и окружающей среды. Влияние добавок на этот процесс нарастает с повышением температуры. Очевидна ускоренная потеря подвижности смеси с добавкой СН, отражающая повышение темпа развития реакций гидратации цемента и связывания им воды затворения.

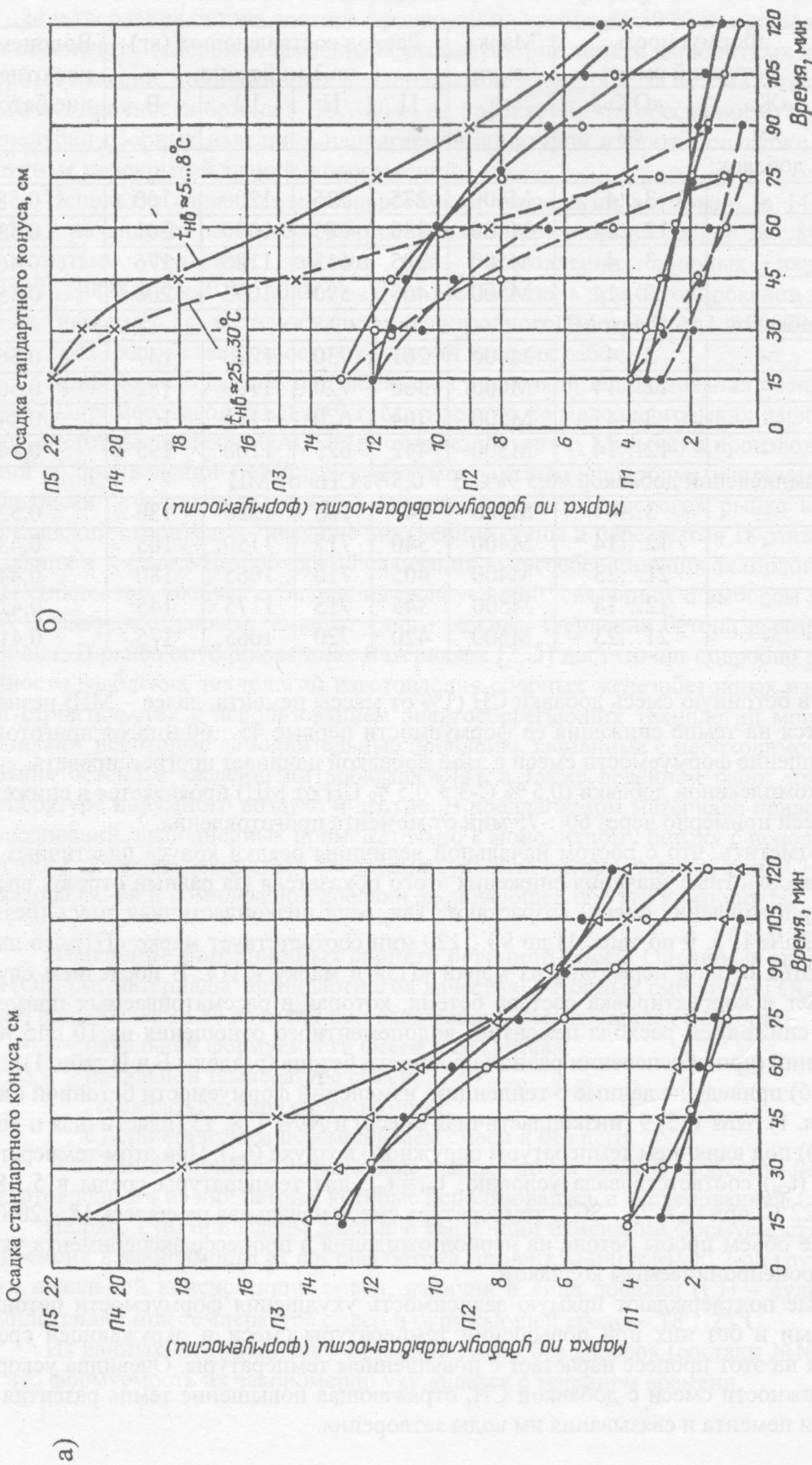


Рис. 1. Тенденция изменения подвижности бетонной смеси с добавками при $t_{см} \sim t_{нв} \sim 18...22^{\circ}\text{C}$ (а) и тенденция изменения подвижности бетонной смеси под влиянием температуры среды (б). Условные обозначения: \bullet — смесь без добавок; \circ — $0,5\% \text{ C-3} + 0,5\% \text{ CH}$; \square — $0,5\% \text{ C-3} + 0,5\% \text{ CH}$; \times — литая смесь с $0,5\% \text{ C-3} + 0,5\% \text{ CH}$ 1% CH;

Комплексная добавка, введенная в низкопластичную смесь (состав № 9), за счет поверхностно-активных веществ, содержащихся в пластификаторе С-3, оказывает стабилизирующее действие на процесс снижения подвижности, несмотря на уменьшение начального водосодержания смеси и водоцементного отношения бетона. Эффект стабилизации сохраняется до 90...60 мин для пластичной массы (состав № 10) и до 30 мин в литой смеси (№ 13), а затем снижение формуемости прогрессирует и, особенно, с ростом температуры до 25...30⁰С.

Динамика изменений формуемости низкопластичной смеси (П1), пластичной (П3) и литой (П5), с ростом температуры характеризуется более высоким темпом снижения для литой смеси, затем пластичной. Низкопластичная смеси относительно медленно теряют формуемость в диапазоне температур 5...30⁰С.

В таблице 2 приведены данные об изменении подвижности низкопластичной бетонной смеси (составы №№ 1, 5 и 9) и пластичной (№№ 2, 6, 10) для бетона класса С12/15, которые перемешивали (в лабораторном бетоносмесителе) в течение 2, 15 и 30 минут, имитируя вариант ее транспортирования с постоянным (или периодическим, но продолжительным) побуждением в пути следования. Учитывая, что частота вращения лопастей вала лабораторного бетоносмесителя принудительного действия в 6 раз и более превышает скорость вращения барабана автобетоносмесителя, интенсивность воздействия на смесь примерно сопоставима с вероятным воздействием на нее в процессе транспортирования автобетоносмесителем. Температура бетонной смеси и окружающей среды соответствовала 18...22⁰С.

Таблица 2

Влияние продолжительного перемешивания на сохраняемость формовочных свойств бетонных смесей

Номер состава бетона по табл. 1	Наличие и вид примененной добавки	Время перемешивания смеси, мин	Изменение формуемости бетонной смеси (ОК, см) за период (в мин) от момента приготовления				
			0	15	30	45	60
1	-	2	4	3	2,5	2	≈ 2
5	СН	2	5	4	3	2	1,5
9	К	2	5	4	3,5	3	2,5
2	-	2	15	14	12	11	9,5
6	СН	2	15	13	12	10	8
10	К	2	16	14	13	12	10,5
1	-	15	5	3	1,5	0,5	-
5	СН	15	5	2	1	-	-
9	К	15	6	3,5	2,5	0,5	-
2	-	15	16	12	9,5	6	3,5
6	СН	15	16	11	7	3	0,5
9	К	15	17	13	10	≈ 7	3
1	-	30	3,5	≈ 2	≈ 1	0,5	-
5	СН	30	4	1	≈ 0,5	-	-
9	К	30	4,5	2,5	≈ 2	0,5	-
2	-	30	14	11,5	6	3	0,5
6	СН	30	14	11	5	1	-
9	К	30	15	11,5	≈ 6	2,5	-

Как следует из полученных данных, увеличение времени перемешивания до 30 мин не вносит существенных изменений в показатель формуемости смеси, определенный сразу после выгрузки. Однако появляется тенденция ее незначительного снижения, что, на наш взгляд, связано со следующим.

С ростом времени перемешивания бетонной смеси нарастает эффект увеличения площади поверхности твердой фазы, способной адсорбировать воду. Во-первых, за счет возрастающего во времени процесса дезагрегации (распадения) цементных флокул и вступления в контакт (и реакцию) с водой дополнительных реакционно-способных поверхностей вяжущего. Во-вторых, сказывается переход пылевидных частиц, удерживаемых поверхностью заполнителей, в объем цементного теста. Это приводит к дополнительному перераспределению жидкости и ее связыванию поверхностью дисперсных частиц пылевидных фракций. В-третьих, возникающее в процессе перемешивания полидисперсной массы, насыщенной зернами твердой фазы, силы трения активизируют поверхностные силы частиц вяжущего, что способствует ускорению процессов гидролиза и гидратации цемента. Отмеченные эффекты дополняются постоянными нарушениями стабильности в формировании вокруг цементных зерен реакционных оболочек, которые в статическом состоянии системы «цемент-вода» достаточно быстро формируются, уплотняются и начинают сдерживать развитие гидратационного процесса.

Изложенное подтверждается ускоренным последующим снижением подвижности бетонной смеси во времени с увеличением времени перемешивания. Так, смесь без добавки (составы № 1 и № 2) сохраняет подвижность в пределах марки П1 (4...1 см) при 2 мин перемешивании до 90 мин, при 15 мин – до 30...45 мин и при 30 мин перемешивания – до 30 мин; для марки П3 (15...10 см) это время соответствует 60, 30 и 15...20 мин.

Введение в смесь с продолжительным перемешиванием добавки СН ускоряет процесс потери ей подвижности, например, в пределах марки П1 – до 15...30 мин от момента приготовления, а для марки П3 – до 15...20 мин.

Комплексная добавка обеспечивает некоторый рост подвижности пластичной смеси сразу после выгрузки при продолжительном перемешивании (очевидно из-за более равномерного распределения в объеме цементного теста и бетона компонентов добавки, чем это имеет место при традиционном времени перемешивания) и несколько стабилизирует пластические свойства во времени. Однако эффект этот (из-за развития ранее изложенных процессов) непродолжителен и не превышает 20...30 мин после выгрузки смеси.

Кинетика «беспрогрессного» твердения бетона. Исследовали режимы твердения бетона с добавками: 1 % СН и комплексной «0,5 % С-3 + 0,5 % СН» без подвода тепла в диапазоне температуры среды твердения 5...30⁰С (температура начальная бетонной смеси равнялась 5...20⁰С) для ведения бетонных работ монолитным способом из смесей, оцениваемых марками П3...П5, то есть более 10 см осадки стандартного конуса.

В экспериментах использовали цемент марок М400 и М500 2-й группы эффективности при пропаривании (табл. 3), щебень гранитный и мелкий заполнитель со стандартными характеристиками.

Образцы бетона (размерами 150x150x150 мм) изготавливали в формах (из доски $\delta = 25$ мм, $K_T = 2,44$ Вт/(м² · °С); металлических с утеплением минватой, $K_T \sim 1,0$ Вт/(м² · °С); фанерных с утеплением минватой, $K_T = 0,6$ Вт/(м² · °С)) с укладкой смеси вибрированием ($A \sim 0,5$ мм; $f \sim 50$ Гц) в течение ~ 5 с (для подвижности смеси марки П3) и штыкованием с «постукиванием» формы о жесткое основание (литая смесь, П5). Поверхность образцов укрывали полиэтиленовой пленкой и крышкой, материал которой (а при термостатировании бетона и материал теплоизоляции) соответствовал материалу (теплоизоляции) стенок формы-опалубки.

Составы бетона для исследований

№ п/п	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, у.ед.
				Ц	П	Щ	В		
А. Составы без добавок									
1(2)*	C12/15	12...14	M400	380	685	1090	201	0,53	1,6
2(4)	C25/30	12...14	M500	465	590	1095	208	0,45	1,42
Б. Составы с добавкой 1 % СН									
3(6)	C12/15	12...14	M400	360	720	1100	182	0,50	1,44
4(8)	C25/30	12...14	M500	442	625	1100	195	0,44	1,38
В. Составы с комплексной добавкой 0,5 % С-3 + 0,5 % СН									
5(10)	C12/15	12...14	M400	340	715	1150	163	0,48	1,32
6(11)	C12/15	21...23	M400	405	710	1065	180	0,44	1,27
7(12)	C25/30	12...14	M500	345	715	1175	146	0,42	1,2
8(13)	C25/30	21...23	M500	420	720	1065	175	0,41	1,26

*В скобках нумерация составов бетона по табл. 1.

Экспериментальные данные о кинетике твердения бетона, оцениваемой по росту его прочности на сжатие, выраженной в процентах от проектной (в возрасте 28 суток), представлены в виде графических зависимостей на рис. 2 (а, б, в, г).

Очевидно, что использование добавки СН и комплексной: С-3 + СН, обеспечивает стабильный рост прочности бетона для всех вариантов материала палубы опалубки (металл, деревянная доска, фанера), а также с утеплением (термоизоляцией) опалубки или без него для всего диапазона: 5...30⁰С, температуры окружающей среды. При этом эффективность комплексной добавки несколько ниже в первые 24...48 часов твердения при температуре среды в 5...20⁰С.

С повышением температуры среды твердения до 25...30⁰С эффективность комплексной добавки в первые сутки сравнивается с добавкой СН, а затем рост прочности бетона несколько превышает аналогичный для добавки СН.

Отмеченное явление отражает эффект «торможения» реакций гидратации цемента органической составляющей добавки С-3, ее поверхностно-активными веществами. Он явно выражен при пониженной температуре бетонной смеси и среды твердения бетона и практически исчезает (в пределах первых 24 часов твердения) с повышением температуры твердения бетона до 25...30⁰С. Более того, начинает проявляться эффект повышения темпа роста бетона с комплексной добавкой за счет более низкого водоцементного отношения и относительного водосодержания цементного теста.

Таким образом, при естественном твердении бетона в диапазоне температуры 5...20⁰С предпочтительнее добавка СН, если при этом не требуется применять бетонные смеси подвижностью марок П4, П5. Этот вывод подтверждается и экономической целесообразностью, так как добавка С-3 в несколько раз дороже СН (как белорусских предприятий-производителей, так и при поставке из-за рубежа).

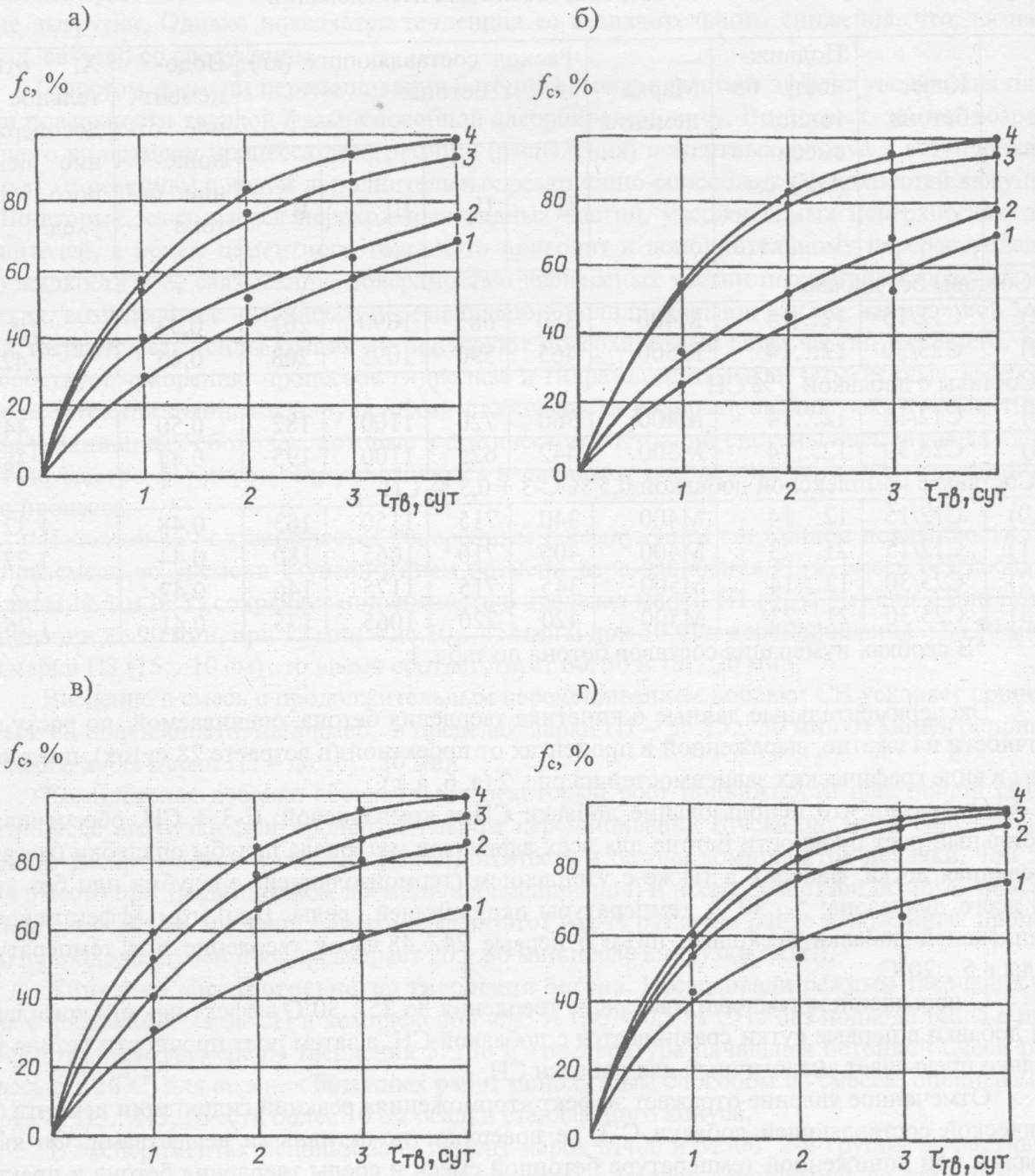


Рис. 2 Кинетика роста прочности бетона с добавкой 1 % СН (а) и с комплексной добавкой «0,5 % С-3 + 0,5 % СН» (б) в металлических теплоизолированных формах; то же с добавкой 1 % СН в деревянных формах (в) и фанерных теплоизолированных формах (г). Графики 1, 2, 3 и 4 для температуры среды: $t_{нв} = 5...8; 12...15; 18...22$ и $25...30$ °С, соответственно.

Анализ влияния консистенции бетонной смеси на темп твердения бетона, приготовленного из смесей различной подвижности, свидетельствует, что явно выраженная взаимосвязь этих факторов отсутствует. Например, при сравнении кинетики роста прочности бетона составов № 5 и № 6, а также № 7 и № 8 (табл. 3), которые характеризуются подвижностью смеси марки ПЗ и П5 соответственно, становится очевидным равнозначимый прирост проч-

ности бетона, при прочих равных условиях (температура среды, материал форм, степень теплоизолированности форм). Сохранение практически постоянным темпа роста прочности бетона при росте пластичности смеси в наших экспериментах обусловлено тем, что повышение последней достигнуто за счет эффекта пластификации ее комплексной добавкой при рациональной корректировке состава бетона. В результате более пластичная смесь (составы № 6 и № 8) характеризуется величиной $(B/C)_{бет}$ и относительного водосодержания (X) даже несколько меньше начальной (составы № 5 и № 7), что и обеспечивает сохранение кинетики роста прочности бетона на равнозначном уровне, в сравнении с бетоном из смеси меньшей подвижности.

Эффективность опалубок по критерию влияния на темп роста прочности бетона, твердеющего в естественных условиях (беспрогревная технология), связана обратной зависимостью со значением коэффициента их теплопередачи. По экспериментальным данным в диапазоне температуры среды твердения $5...30^{\circ}\text{C}$ они по этому показателю располагаются в ряд: утепленная опалубка с палубой из фанеры, утепленная металлическая, деревянная, металлическая, т.е. в соответствии с ростом $K_T \sim 0,6...3,5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ для указанных разновидностей опалубки.

Оценивая эффективность применения термоизолированных опалубок для обеспечения беспрогревной технологии монолитного бетонирования приходим к выводу, что в сочетании с добавками СН и «С-3 + СН», они обеспечивают прочность бетона в 50 % от проектной за 48...60 ч твердения при температуре среды в $5...8^{\circ}\text{C}$, за 24...48 ч при $t_{нв} \sim 12...15^{\circ}\text{C}$, за 24 ч при $t_{нв} \sim 20...30^{\circ}\text{C}$. Прочность бетона $\geq 70\%$ от проектной в аналогичных условиях обеспечивается за 3...4, 2...3, 2 суток соответственно. Меньшие значения времени твердения относятся к опалубке с фанерной (деревянной) палубой ($K_T \sim 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$) при скорости ветра 0 м/с). Приведенные значения прочности бетона обеспечивают бездефектную распалубку вертикальных и наклонных конструкций ($\geq 50\%$), а также изгибаемых и с преднапряжением арматуры ($\geq 70\%$).

Твердения бетона с добавками по малоэнергоемкой технологии при отрицательной температуре окружающей среды. В экспериментах использовали бетон составов, приведенных в таблице 3, с добавкой 1 % СН (№ 3) и с комплексной добавкой 0,5 % С-3+0,5 % СН (№ 5, № 7). Эти составы характеризуются одинаковой консистенцией ($OK \sim 12...14 \text{ см}$), примерно равным содержанием цемента (340...360 кг на 1 м^3 бетона), но различаются значениями водоцементного отношения и относительного водосодержания (№ 1, № 5 и № 7, соответственно, $B/C = 0,5$ и $X = 1,44; 0,48$ и $1,32; 0,42$ и $1,2$).

Разогрев бетона со скоростью до $10^{\circ}\text{C}/\text{час}$ осуществляли электродным методом при сквозном прогреве (пластинчатые электроды) перед установкой форм в камеру твердения.

Электроток ($U = 36 \text{ В}$, сила тока – $J \sim 100 \text{ А}$) подводили от понижающего трансформатора, используя 2 фазы. 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 $t_{нв} \sim 18...20^{\circ}\text{C}$) и усредненная мощность: $P_{экз} \sim 0,8 \text{ кВт}/\text{м}^3$, соответствующая тепловыделению цемента и учитываемая со знаком минус. Приведенные данные получены для разогрева бетона в формах (из деревянной доски $\delta = 25 \text{ мм}$, расчетная средняя плотность $700 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость $C_y \sim 2,52 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$, без утепления, и из фанеры $\delta = 12 \text{ мм}$, расчетная средняя плотность $600 \text{ кг}/\text{м}^3$, теплоемкость $C_f \sim 2,52 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot ^{\circ}\text{C})$, с утеплением слоем в 60 мм минеральной ваты) до температуры $30...50^{\circ}\text{C}$ 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: $P_{под} \leq P_{уд}$.

Разогретые образцы в формах с крышками (конструкция их соответствовала конструкции стенок), помещали в морозильную камеру, отрегулированную на заданный уровень температуры в -5, -10 и -20⁰С. 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 добавками при различной температуре начального разогрева, температуре среды твердения, степени теплоизоляции форм (опалубки) и модуля поверхности при твердении образцов в условиях

Таблица 4

Значения мощности для разогрева в расчете на 1 м³ бетона

Температура разогрева бетона, °С	Вид формы по табл. 4.1	Расчетные значения мощности на стадии разогрева бетона, кВт/м ³ :				
		P _{бет}	P _{оп}	P _{атм}	P _{экз}	P _{под}
30	доска	0,7	2,45	0,975	-0,8	4,125
	фан. ут.		1,366	0,24		2,306
40	доска	0,7	2,45	1,95	-0,8	4,7
	фан. ут.		1,366	0,46		2,526
50	доска	0,7	2,45	2,926	-0,8	6,076
	фан. ут.		1,366	0,72		2,786

термоса (без дополнительного подвода тепла), приведены в таблице 5. Результаты испытаний в ее разделах – А, Б и В, получены для образцов кубов размерами 150x150x150 мм, твердевших в индивидуальных формах (модуль поверхности M_п = 40 м⁻¹), а раздела Г – для бетона из 12 форм, составленных в 2 ряда по высоте и ширине (M_п ~ 18 м⁻¹), в общем на весь блок из форм № 4 теплоизолирующем кожухе. Коэффициент теплопередачи конструкции кожуха: K_т ≈ 0,6 Вт/(м²·°С), при V_в = 0 м/с.

Таблица 5

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

Температура разогрева бетона, °С	Характеристики бетона			Прочность бетона в % от f _{c28} после термостатической выдержки, час				Температура бетона образцов через 24 ч твердения
	Номер состава по табл. 3	Класс бетона	Вид добавки	12	18	24	через 28 сут твердения в камере с ВР*	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
А. Температура в камере хранения: - 5 °С								
30	3	C12/15	СН	52	60	65	107	18
	5	C12/15	К	48	58	60	110	
	7	C15/30	К	49	57	62	113	
40	3	C12/15	СН	60	68	76	-	25
	5	C12/15	К	56	64	75	-	
	7	C15/30	К	57	66	75	-	
50	3	C12/15	СН	74	79	84	102	31
	5	C12/15	К	72	80	84	106	
	7	C15/30	К	73	81	86	108	

1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	3	C12/15	СН	45	49	55	-	5
	5	C12/15	К	40	46	52	-	
	7	C15/30	К	42	46	54	-	
Б. Температура в камере хранения: - 10 °С								
30	3	C12/15	СН	46	54	61	103	15
	5	C12/15	К	43	52	58	107	
	7	C15/30	К	44	51	58	111	
40	3	C12/15	СН	56	64	70	-	22
	5	C12/15	К	52	63	71	-	
	7	C15/30	К	54	66	70	-	
50	3	C12/15	СН	70	75	80	105	28
	5	C12/15	К	68	76	80	107	
	7	C15/30	К	71	76	82	109	
В. Температура в камере хранения: - 20 °С								
30	3	C12/15	СН	42	49	53	105	9
	5	C12/15	К	40	44	50	110	
	7	C15/30	К	40	46	50	110	
40	3	C12/15	СН	52	59	65	-	16
	5	C12/15	К	48	55	63	-	
	7	C15/30	К	50	55	63	-	
50	3	C12/15	СН	61	68	76	103	22
	5	C12/15	К	59	66	73	105	
	7	C15/30	К	60	66	75	108	
Г. Температура в камере хранения: - 20 °С, модуль поверхности блока образцов $M_{\Pi} \sim 18 \text{ м}^{-1}$								
30	3	C12/15	СН	55	62	67	105	21
	5	C12/15	К	53	63	65	108	
	7	C15/30	К	54	61	68	109	
50	3	C12/15	СН	76	85	94	101	37
	5	C12/15	К	75	84	95	105	
	7	C15/30	К	78	85	98	106	
50	3	C12/15	СН	58	64	68	-	12
	5	C12/15	К	55	60	65	-	
	7	C15/30	К	56	62	66	-	

* Примечание: в камере с нормально-влажностным режимом твердения.

Анализ данных табл. 5. позволяет сделать следующие выводы.

Неутепленная опалубка (данные, относящиеся к форме из доски) не рациональна к использованию при реализации малоэнергоёмкой технологии в зимний период работ. Темп роста прочности бетона резко снижается при отсутствии теплоизоляции и повышении коэффициента теплопередачи опалубки (от $K_T = 0,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$ и до $K_T = 2,44 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{С})$) при соответствующем увеличении потерь тепла в окружающую среду. Вместе с тем и в этом случае прочность бетона с добавками 1 % СН и 0,5 % С-3 + 0,5 % СН, разогретого до температуры 50 °С, через 18...24 ч «термосного» твердения достигает 45...65 % от проектной в диапазоне температуры внешней среды $t_{\text{нв}} \sim -5...-20 \text{ } ^\circ\text{С}$ при модуле поверхности $M_{\Pi} \sim 40...18 \text{ м}^{-1}$ соответственно. То есть, обеспечивается условие не только бездефектной распалубки вертикаль-

ных и наклонных элементов зданий и сооружений, но и несущая способность этих конструкций, позволяющая вести дальнейшие работы с частичной загрузкой их.

При использовании утепленных типов опалубок, даже при устройстве тонкостенных конструкций с модулем теплоотдающей поверхности до $M_{\text{п}} \sim 40 \text{ м}^{-1}$, добавки СН и комплексная С-3 + СН в сочетании с разогревом бетона до 50°С обеспечивают достижение им прочности $\geq 70\%$ в пределах 24 ч твердения при температуре наружного воздуха $t_{\text{нв}} = -5 \dots -20^{\circ}\text{С}$. Это подтверждение целесообразности использования в зимний период только теплоизолированных опалубок, что обеспечивает эффективную реализацию малоэнергоемкой технологии бетонирования.

Изменение модуля теплоотдающей поверхности, а, соответственно и теплотеря в окружающую среду, закономерно влияет на 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 обратную с ее коэффициентом теплопередачи.

Например, конечная (через 24 ч твердения при $t = -5^{\circ}\text{С}$) температура бетона, при разогреве смеси до 50°С для форм фанерных с теплоизоляцией и форм из доски, составила 31°С и 5°С соответственно, а уровень прочности бетона $\approx 85\%$ и $\approx 53\%$. Оцениваемая средним арифметическим температура твердения бетона в фанерных утепленных формах и из доски равнялась $t_{\text{ср}}^{\text{ф.в.}} \sim 40^{\circ}\text{С}$ и $t_{\text{ср}}^{\text{д}} \sim 27^{\circ}\text{С}$. Понижение модуля теплоотдающей поверхности от $M_{\text{п}} = 40 \text{ м}^{-1}$ (раздел А) до $M_{\text{п}} = 18 \text{ м}^{-1}$ (раздел Г) способствовало повышению средней температуры твердения бетона за 24 ч до 31°С (для фанерных форм с утеплением) и обеспечило рост прочности бетона с добавками от $\sim 53\%$ до $\sim 65 \dots 67\%$.

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

Однако с ростом температуры разогрева увеличиваются и энергетические затраты, что снижает эффективность технологии. Поэтому, более целесообразно реализовать разогрев до минимально необходимой температуры бетона с добавками, 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. 5.

Различие во влиянии добавок СН и комплексной С-3 + СН на кинетику роста прочности бетона при разогреве до $30 \dots 50^{\circ}\text{С}$ заметно в течение 24 ч. Бетон с добавкой СН быстрее набирает прочность, чем с комплексной. При этом с ростом температуры разогрева "тормозящий" эффект пластифицирующего компонента комплексной добавки снижается. Например, при температуре наружного воздуха в -5°С и разогрева смеси до 50°С темп роста прочности бетона с обеими добавками выравнивается к 18 ч, а к 24 ч превалирует бетон с комплексной добавкой. Вместе с тем при понижении температуры среды твердения, например, до -20°С (то есть, и понижении средней температуры твердеющего бетона) наблюдается незначительное сдерживающее влияние пластификатора. Однако необходимо отметить, что при последующем «дозревании» бетона в нормально-влажностных условиях до возраста 28 сут прочность бетона с комплексной добавкой (при прочих равных условиях) несколько выше, чем с добавкой СН. Это результат снижения начального водосодержания бетона с комплексной добавкой и соответствующего роста плотности его структуры.

Обработка результатов экспериментов представлена в виде таблицы 6, в которой приведены рекомендуемые режимы твердения бетона с добавками СН и С-3 + СН в теплоизолированной опалубке.

Таблица 6

Режимы твердения бетона с добавками по «малоэнергоёмкой» технологии (для цемента 2 группы эффективности при пропаривании)

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

Примечание: * не рекомендуется.

Заключение

Результаты исследований кинетики изменения свойств бетонной смеси и кинетики роста прочности бетона, приготовленного на традиционных материалах с отечественными химическими добавками, свидетельствуют о возможности реализации высокоэффективных энергосберегающих технологий и их широкого применения в строительной практике.

Литература

1. Ратинов, В.Б., Розенберг, Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 188 с.
2. Батяновский, Э.И., Осос, Р.Ф. Технологические особенности производства ЖБИ с применением ускорителей твердения бетона. В сб. статей 1-го научно-методического межвузовского семинара, 1998 г., № 1, с. 22-25.
3. Батяновский, Э.И., Осос, Р.Ф. О кинетике твердения бетона с сульфатосодержащими добавками. Материалы VIII Международного научно-практического семинара, 2001, № 1, с. 188-195.
4. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.