

УДК 691.32

УПРАВЛЕНИЕ КИНЕТИКОЙ ТВЕРДЕНИЯ БЕТОНА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Минаков Ю.А., Кононова О.В., Анисимов С.Н., Грязина М.В.

*ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»,
Йошкар-Ола, e-mail: ov-kononova@mail.ru, ansernik3@gmail.com*

Проведение бетонных работ при отрицательных температурах требует применения специальных методов зимнего бетонирования. Наиболее часто применяют методы обогрева, утепления и введения в бетон противоморозных добавок. Проведены исследования по изучению кинетики нарастания прочности бетона при использовании универсальной противоморозной добавки (УПД-2М) при различном содержании цемента и добавки. Исследования показали, что в реальных условиях колебания отрицательных температур ($-20 \pm 11^\circ\text{C}$) необходимо обеспечить благоприятные условия твердения ($+20^\circ\text{C}$) в первые сутки твердения. При таких условиях бетон набирает 30% проектной прочности. Исследована кинетика нарастания прочности самоуплотняющегося бетона в условиях обогрева в термоактивной опалубке ($30-40^\circ\text{C}$). Установлено, что бетон набирает 50% от проектной прочности на вторые сутки твердения. На основании проведенных исследований рекомендовано оптимизировать продолжительность обогрева с учетом содержания цемента в бетоне и температуры обогрева.

Ключевые слова: отрицательная температура, обогрев, противоморозная добавка, твердение бетона, самоуплотняющийся бетон, проектная прочность, температура обогрева

SUBZERO TEMPERATURES CONCRETE HARDENING KINETICS MANAGEMENT

Minakov Y.A., Kononova O.V., Anisimov S.N., Gryazina M.V.

Volga State University of Technology, Yoshkar-Ola, e-mail: ov-kononova@mail.ru, ansernik3@gmail.com

The subzero temperatures concrete work performance requires special winter methods application. The heating, insulation and concrete antifreeze additives putting in are the most commonly used methods. The concrete strength growth kinetics while using universal antifreeze additive (UAA-2M) with different content of cement and additive study performed. It was found out that in the real negative temperatures ($-20 \pm 11^\circ\text{C}$) favorable hardening conditions ($+20 \pm 2^\circ\text{C}$) in the first day of hardening must be obtained. The concrete is gaining 30% of desired strength at such conditions. The self-compacting concrete strength growth kinetics at the thermosetting ($30-40^\circ\text{C}$) in the second days mold heating studied. Found that the concrete is gaining 50% of the desired strength. The result of the investigations: the heating duration due the concrete amount of cement and the heating temperature optimization is recommended.

Keywords: subzero temperature, insulation, antifreeze additive, concrete hardening, the self-compacting concrete, the desired strength, the heating temperature

Проведение бетонных работ в зимних условиях требует применения специальных методов зимнего бетонирования, из которых наиболее распространены методы обогрева, утепления и введения в бетон противоморозных добавок [1].

При выборе вида противоморозной добавки ориентируются на минимальную температуру, при которой эффективно ее использование. Способ зимнего бетонирования с применением противоморозных добавок прост и экономичен, но в условиях значительных колебаний отрицательных температур представляется сложным установить рациональную дозировку противоморозной добавки. На практике чаще всего вследствие существования температурных ограничений к использованию добавок от применения противоморозных добавок приходится отказываться в пользу методов обогрева бетона [3,5].

Преимуществом методов обогрева является возможность поддержания положительной температуры в теле твердеющего бетона в пределах, позволяющих прогно-

зировать нарастание прочности бетонной конструкции. Поэтому, несмотря на удорожание бетонных работ, методы обогрева более распространены [4]. Среди методов обогрева наиболее технологичны методы электрообогрева. Электрообогрев бетона сегодня остается единственным методом, который применим при значениях отрицательных температур до -45°C [3]. Критерием достаточности обогрева считается достижение бетоном прочности на уровне 30–40% проектной, после которого процесс твердения при медленном остывании будет продолжаться независимо от внешнего теплового воздействия [5]. В связи с этим актуальной с технико-экономической точки зрения представляется задача определения минимального периода обогрева бетона и рациональной температуры прогрева бетона до получения нормируемого процента проектной прочности [2].

Цель работы состояла в сравнительной оценке эффективности применения комплексного метода обогрева бетона, предусматривающего применение химических

модификаторов, влияющих на скорость твердения бетона и его конечную прочность. Критерием эффективности выбрана кинетика нарастания прочности бетона с модифицирующими добавками, обогреваемого в первые сутки твердения, и продолжительность периода времени, необходимого для достижения бетона нормируемого процента проектной прочности 30–35%.

Задача исследования состояла в изучении участия в кинетике нарастания прочности бетонов, обогреваемых в начальный период противоморозной и суперпластифицирующей добавок.

Материалы и методы исследования

В качестве химических модификаторов применялись две добавки: противоморозная добавка УПД-2М производства ООО «Инновация» (г. Казань) и суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфира Glenium®51 производства фирмы BASF.

Универсальная противоморозная добавка УПД-2М относится к категории комплексных. Она ускоряет процесс твердения бетонов и строительных растворов, улучшает удобоукладываемость бетонных смесей, повышает прочность, морозостойкость и трещиностойкость бетона. Рекомендуется к использованию при температуре не ниже -18°C . Суперпластификатор Glenium®51 используется в технологии самоуплотняющихся бетонов. Достоинством модификатора является высокая пластифицирующая способность, а также повышение конечной прочности бетона. Повышение содержания добавки увеличивает индукционный период твердения цемента, препятствуя нарастанию прочности в ранние сроки. Установлено, что умеренный обогрев цементных паст с добавкой Glenium®51 интенсифицирует их твердение на ранних стадиях [2].

При исследовании бетонов с добавкой УПД-2М в качестве вяжущего в бетонах применялся портландцемент ЗАО «Ульяновскцемент» класса ЦЕМ II/A-III

32,5Б. В качестве мелкого заполнителя использовался природный песок с модулем крупности 2,62 и гравий из изверженных пород фракции 5–20 мм. Содержание цемента варьировалось в пределах от 300 до 500 кг/м³. Добавка УПД-2М вводилась в количестве до 2,7% от массы цемента. Из пластичных бетонных смесей подвижностью 12 см по осадке конуса формовались образцы размером 100×100×100 мм. Прочность бетонов контролировалась разрушающим методом.

Для исследования влияния обогрева на твердение бетона с суперпластификатором Glenium®51 нами были исследованы составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей, предназначенные для заполнения швов сборно-монолитного железобетонного каркаса многоэтажного здания. Для приготовления составов применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовцемент» с удельной поверхностью 360 м²/кг природный мелкозернистый кварцевый песок с модулем крупности 1,2; кварцевый наполнитель, приготовленный помолом природного кварцевого песка до удельной поверхности 100 м²/кг. Суперпластификатор Glenium®51 вводился в количестве 1,5% от массы цемента. Из самоуплотняющихся смесей методом литья формовались образцы – кубы с ребром 20 мм. Для интенсификации процесса твердения образцы в течение первых 3-х суток обогревались при 30–40^oC, после чего твердение образцов происходило при температуре $+20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$.

Результаты исследования и их обсуждение

При изучении влияния добавки УПД-2М основные образцы бетона первые сутки выдерживались при температуре $+(20 \pm 2)^{\circ}\text{C}$, что соответствовало их умеренному обогреву в условиях отрицательных температур. Дальнейшее их твердение происходило в реальных зимних условиях. Результаты мониторинга реального колебания отрицательных температур приведены на рис. 1.

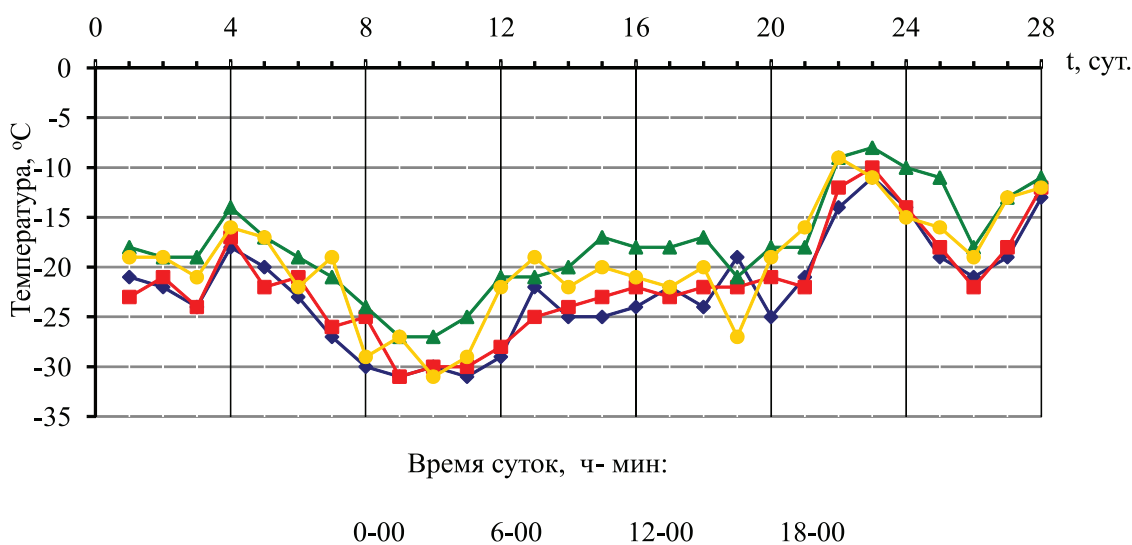


Рис. 1. Результаты мониторинга реальной температуры твердения бетона с добавкой УПД-2М

Фактические усредненные колебания температуры в период испытания, как показали статистические наблюдения, в первом приближении можно описать диапазоном температур $(-20 \pm 11)^\circ\text{C}$.

Наряду с основными образцами формовались контрольные образцы бетона, которые твердели в нормальных условиях лаборато-

рии при температуре $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ и относительной влажности воздуха $95 \pm 5\%$.

Перед испытанием на сжатие основные образцы оттаивали на воздухе в течение 4 ч при температуре окружающей среды $(+20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Результаты испытания составов бетона с добавкой УПД-2М в возрасте 28 суток приведены в табл. 1.

Таблица 1

Прочность при сжатии бетонов с добавкой УПД-2М

№ п/п	Составы бетонных смесей, кг/м ³					Предел прочности при сжатии образцов:		
	Цемент, кг	Гравий, кг	Песок, кг	Вода, л	УПД-2М, %, от массы цемента	контрольных, МПа	основных МПа %	
1	500	900	900	190	2,7	46,8	15,4	32,9
2	500	900	900	230	-	36,8	6,9	18,7
3	300	1000	1000	160	2,7	26,0	5,2	20,0
4	300	1000	1000	185	-	16,0	2,6	16,2
5	500	900	900	190	1,35	42,0	10,7	25,5
6	300	1000	1000	165	1,35	20,5	4,3	21,0
7	400	950	950	165	2,7	32,8	8,5	25,9
8	400	950	950	210	-	26,8	4,0	15,0
9	400	950	950	170	1,35	29,6	6,3	21,3

Анализ полученных результатов показал, что присутствие противоморозной добавки УПД-2М оказывает на бетонную смесь пластифицирующий эффект и позволяет ускорить процесс твердения бетонов. Установлено, что водопотребность равноподвижных бетонных смесей понизилась на 13–17%. Отмечено нарастание прочности бетона с увеличением содержания добавки

при постоянном расходе цемента как у основных, так и у контрольных образцов. На основании проведенных исследований построена регрессионная полиномиальная математическая модель зависимости прочности бетона Y_1 , МПа от содержания в бетоне цемента (X_1) и содержания противоморозной добавки УПД-М2 (X_2). При доверительной вероятности 95 % она имеет вид:

$$Y_1 = 6,40 + 3,49 X_1 + 2,60 X_2 + 1,13 X_1^2 + 1,48 X_1 X_2.$$

Наибольший прирост прочности был получен при содержании добавки УПД-2М 2,7% от массы цемента при расходе цемента 500 кг/м³. У контрольных образцов прирост прочности за счет введения добавки составил 27%. У основных образцов прочность возросла более чем в 2 раза, что свидетельствует об интенсификации твердения бетона в присутствии добавки в ранние сроки. Установлено также, что фактические колебания отрицательных температур полностью блокировали рост прочности бетона с добавкой УПД-2М. Прочность, которую показал бетон через 28 суток при твердении в реальных условиях колебания отрицательных температур, не возросла в сравнении с той, которую он приобрел за первые сутки твердения при температуре $(+20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Выявлено также, что если бетон после формовки сразу поместить в сре-

ду с имевшей место во время эксперимента отрицательной температурой, он не способен к набору прочности в этих условиях.

Прочность бетона с добавкой УПД-2М через 1 сутки не ниже 30% 28-суточной прочности была получена только для состава с содержанием цемента 500 кг/м³ при максимальном содержании добавки УПД-2М 2,7% от массы цемента. Если сравнивать прочность бетона с добавкой и бетона без добавки, то можно сделать вывод, что бетон за счет добавки и суточного обогрева в условиях колебания отрицательных температур к 28-суточному возрасту приобретает 40% проектной прочности.

Исследования кинетики твердения самоуплотняющихся мелкозернистых бетонных смесей предполагали выявление роли изотермической температуры обогрева в первые трое суток на формирование

прочности составов. В табл. 2 приведены составы бетонных самоуплотняющихся смесей. Кинетика роста их прочно-

сти $R_{сж}$, МПа, в зависимости от времени t и температуры T твердения представлена на рис. 2.

Таблица 2

Составы бетонных смесей наливного типа с суперпластификатором Glenium® 51

Номер состава	Содержание компонентов смеси, масс. %			Glenium-51, % от массы цемента	Водотвердое отношение	Расплыв по конусу Хегерманна, мм	T, °C
	Цемент	Наполнитель	Песок				
1	50	15,6	34,4	–	0,253	220	20
2	50	15,6	34,4	1,5	0,165	300	20
3	50	15,6	34,4	–	0,253	220	40
4	50	15,6	34,4	1,5	0,165	300	40
5	50	15,6	34,4	–	0,253	220	30
6	50	15,6	34,4	1,5	0,165	300	30

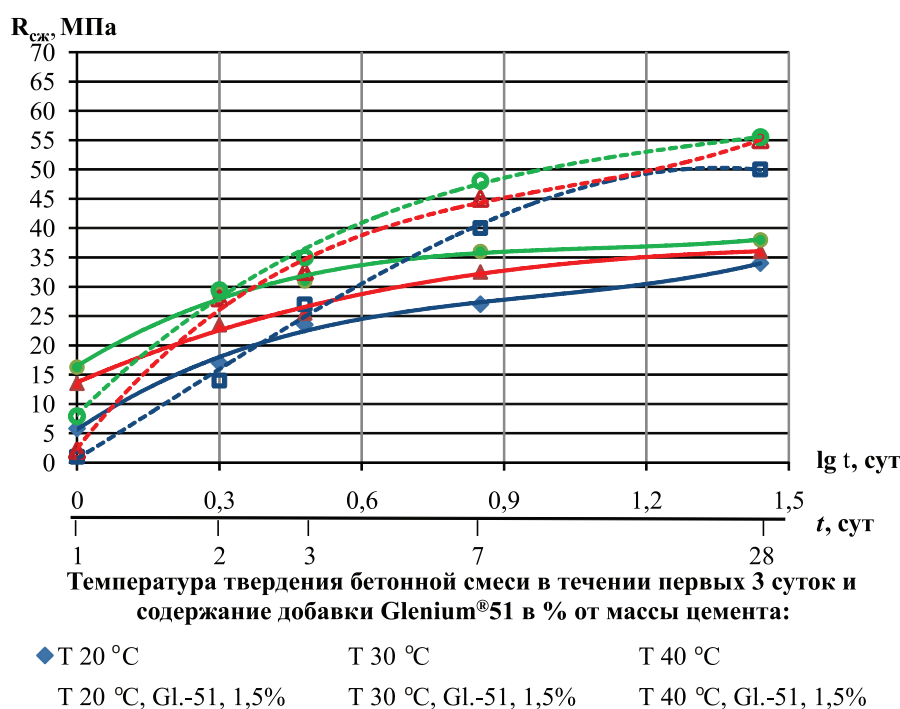


Рис. 2. Кинетика роста прочности самоуплотняющихся смесей с суперпластификатором Glenium® 51 при обогреве

Анализ результатов исследований, приведенных в табл. 2 и на рис. 2, показал, что введение суперпластификатора Glenium®51 в количестве 1,5% от массы цемента сдерживает рост прочности самоуплотняющегося бетона в первые сутки твердения при $+20 \pm 2^\circ\text{C}$ в 5 раз. Но в возрасте 28 суток самоуплотняющийся бетон приобретает на 47% более высокую прочность. Увеличение изотермической температуры обогрева в первые трое суток с $+20 \pm 2$ до $+30-40 \pm 2^\circ\text{C}$ способствует интенсификации твердения бетона на ранней стадии до 13–

27%, что необходимо для обеспечения высоких темпов строительных работ. Обогрев при температуре $40 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение 2 суток самоуплотняющейся бетонной смеси позволяет получить прочность не ниже 50% в сравнении 28-суточной.

Выводы

1. Поскольку невозможно избежать экстремального понижения температуры в зимних условиях в ранние сроки твердения, когда для бетона особенно опасно воздействие отрицательных температур,

эффективно сочетание применения модифицирующих противоморозных добавок с умеренным обогревом.

2. В бетонах с добавкой УПД-2М применение изотермического обогрева при + 20°C в первые сутки твердения обеспечивает 30%-ный прирост прочности от проектной.

3. Увеличение температуры обогрева до 30–40°C в течение первых 2 суток позволило получить прочность самоуплотняющегося бетона не ниже 50% от 28-суточной.

Список литературы

1. Бетонные и железобетонные работы / К.И. Башлай, В.Я. Гендин, Н.И. Евдокимов и др.; под ред. В.Д. Топчия. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1987. – 320 с.
2. Кинетика набора прочности цементного камня с модифицирующими добавками / Л.М. Добшиц, О.В. Кононова, С.Н. Анисимов // Цемент и его применение. – 2011. – № 4. – С. 104–107.
3. Изотов В.С. Химические добавки для модификации бетона. – М.: Изд. Палеотип, 2006. – 244 с.
4. Крылова Б.А. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумян, А.И. Звездова. – М., 2005. – 275 с.
5. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. – 3-е изд. – М.: Стройиздат, 1975. – 750 с.

References

1. Betonnye i zhelezobetonnye raboty K.I. Bashlaj, V.Ja. Gendin, N.I. Evdokimov i dr. Pod red. V.D. Topchiya, 2 izd. M. Strojizdat, 1987. p. 320.
2. Dobshic L.M., Kononova O.V. Anisimov S.N. Kinetika nabora prochnosti cementnogo kamnya s modificirujushimi do-bavkami, Cement i ego primenenie. 2011. no. 4. pp. 104–107.
3. Izotov V.S. Himicheskie dobavki dlya modifikacii be- тона. M. Izd. Paleotip, 2006. pp. 244.
4. Krylova B.A. Rukovodstvo po progrevu betona v mon- olitnyh konstrukcijah. Krylova B.A., Ambarcumjan S.A., Zvez- dova A.I. – Moskva, 2005. pp. 275
5. Mironov S.A. Teoriya i metody zimnego betonirovaniya. Izdanie 3. M. Strojizdat, 1975. pp. 750.

Рецензенты:

Салихов М.Г., д.т.н., профессор, зав. кафедрой АД, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола;

Краснов А.М., д.т.н., доцент, профессор кафедры СМиТС, Поволжский государственный технологический университет, г. Йошкар-Ола.

Работа поступила в редакцию 29.01.2013.