

О КИНЕТИКЕ ТВЕРДЕНИЯ ЦЕМЕНТОГО КАМНЯ И БЕТОНА С ДОБАВКОЙ «УКД-1»

Марко О.Ю.

Введение. Для регулирования свойств бетонной смеси, бетона и экономии цемента применяют различные добавки в бетон. Одним из наиболее эффективных вариантов является использование комплексных химических добавок в бетон, проявляющих эффект пластификации в сочетании с повышением темпа роста прочности, что обеспечивает ускорение оборота опалубок, а в итоге – повышение темпа и сокращение сроков строительства, снижения энергетических затрат в строительном производстве.

Приведенным критериям полностью отвечает новая комплексная химическая добавка «УКД-1», разработанная в Беларуси с использованием в составе отечественного углеродного наноматериала (УНМ) и обладающая эффективным сочетанием пластифицирующе-ускоряющего воздействия на цементный бетон. Это пластифицирующая добавка I группы (по СТБ 1112-98 [1]) с ускоряющим эффектом, применяемая как при изготовлении сборных бетонных и железобетонных изделий и конструкций, так и в монолитном строительстве.

В статье приведены важнейшие результаты исследований влияния добавки «УКД-1» на кинетику твердения цементного камня и бетона в зависимости от свойств использованного цемента, условий и времени твердения.

Материалы для исследований. В качестве вяжущего вещества для бетона использованы цементы отечественных заводов с характеристиками, приведенным в таблице 1.

Таблица 1 – Общая характеристика цементов, использованных в исследованиях

| Завод-изготовитель | Марка цемента | Группа активности при пропаривании | Минералогический состав, % | | | | K _{нтг} | Сроки схватывания, ч; мин | |
|--------------------------------------|---------------|------------------------------------|----------------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|---------------------------|-----------------|
| | | | C ₃ S | C ₃ A | C ₂ S | C ₄ AF | | начало | конец |
| 1. ОАО «Белорусский цементный завод» | M500-Д0 | I | 58 | 7,3 | 20 | 11,5 | 0,255 | 2 ⁰⁵ | 3 ¹⁰ |
| 2. ОАО «Белорусский цементный завод» | M500-Д20 | II | 56,3 | 8 | 20,4 | 10,6 | 0,26 | 2 ⁰⁵ | 3 ²⁰ |
| 3. ОАО «Белорусский цементный завод» | M400-Д0 | I | 56 | 6,5 | 18 | 13 | 0,265 | 2 ¹⁰ | 3 ²⁰ |
| 4. ОАО «Кричевцементношифер» | M500-Д0 | II | 54 | 5 | 21 | 16 | 0,26 | 3 ¹⁵ | 5 ¹⁰ |
| 5. ОАО «Кричевцементношифер» | M400-Д20 | III | 51 | 4,5 | 26 | 15 | 0,27 | 3 ²⁰ | 5 ¹⁰ |
| 6. ОАО «Кричевцементношифер» | M500-Д0 | I | 55 | 4,7 | 20 | 15 | 0,255 | 2 ⁰⁵ | 3 ¹⁷ |
| 7. ОАО «Красносельскстройматериалы» | M500-Д20 | II | 53 | 3,3 | 23 | 15,7 | 0,26 | 2 ³⁵ | 3 ⁵⁵ |
| 8. ОАО «Красносельскстройматериалы» | M400-Д20 | II | 52 | 3,8 | 22 | 17,5 | 0,265 | 2 ³⁰ | 3 ⁴⁰ |

Традиционные материалы для бетона (заполнители и вода) соответствовали требованиям действующей технической нормативно-правовой документации.

В качестве химических добавок были использованы:

- ускоритель твердения – сульфат натрия (Na_2SO_4 ; в тексте аббревиатура – СН) кристаллизационный, ГОСТ 21458-75 [2], производства ОАО «Могилевхимволокно»;
- пластифицирующий компонент – суперпластификатор «СУПЕРПЛАСТ С-3», ТУ 5730-004-97474489-2007 [3] (в тексте аббревиатура «СП»);
- комплексная углеродосодержащая добавка «УКД-1», техническое свидетельство ТС 01.2093.14, выданное РУП «Стройтехнорм» Минстройархитектуры РБ 10.01.2014 г. сроком на 5 лет [4].

Кинетика твердения, прочность цементного камня и активность цемента. Влияние добавки «УКД-1» и ее ускоряющего (СН) и пластифицирующего (СП) компонентов на кинетику твердения цемента исследовали, оценивая изменение прочности цементного камня во времени. Для проведения испытаний использовали портландцемент ПЦ500-Д20 (№2 по таблице 1). Цементное тесто нормальной густоты готовили по методике ГОСТ 310.3-76 [5]; при введении добавок с пластифицирующим эффектом уменьшали начальное водосодержание до консистенции цементного теста, соответствующей тесту нормальной густоты. Образцы-кубы с ребром 20 мм изготавливали в 18-гнездных формах.

При этом одна партия образцов не подвергалась дополнительному разогреву, а вторую – после предварительной выдержки в течение 2 ч, разогревали в формах (в бачке над подогреваемой водой) до температуры 50°C в течение 1,5 ч, а затем образцы остывали в бачке и через 21...22 ч после изготовления их распалубливали. Часть образцов (не менее 3...6 шт. в серии) испытывали в возрасте 24 ч, а остальные твердели до испытаний в помещении лаборатории, гидроизолированными полиэтиленовой пленкой или в воде.

Особенностью эксперимента была пониженная температура среды (воды), равная $10...12^\circ\text{C}$ (по фактическим условиям испытательной лаборатории). Указанные режимы твердения образцов цементного камня приняты, во-первых, с целью максимально исключить возможность изменения начального водосодержания цементного камня в процессе твердения, а во-вторых, имитировать начальным прогревом условия твердения цементного бетона при использовании малоэнергоёмкой технологии, которая включает период разогрева бетона с последующим твердением без подвода тепла [6-9].

Результаты экспериментов с оценкой кинетики изменений прочности цементного камня представлены в таблице 2. Каждое единичное значение прочности (приведена в относительной (%) величине) получено как среднее арифметическое не менее 3...6 образцов в серии. При этом отклонение отдельных значений в серии не превышало 15% от среднего в этой серии. На начальном этапе этих экспериментов (составы №№2...5; 7...10; 12*...15*) оценили влияние пластифицирующего и ускоряющего твердение цемента компонентов на кинетику роста прочности цементного камня.

Таблица 2 – Составы цементного теста и относительная прочность (%) образцов цементного камня

| № состава | Расходы, г (% от МЦ) | | | $K_{\text{НГ}}$ | $\Delta V, \text{г}$ | Условия твердения | | Прочность в % от $R_{28}^{\text{ЦК}}$ в возрасте, сут: | | | |
|-----------|----------------------|-----|----------------------|-----------------|----------------------|-------------------|--------|--|----|-----|-----|
| | В | Ц | добавка | | | НВУ | в воде | 1 | 3 | 7 | 28 |
| | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 1 | 102 | 400 | - | 0,255 | - | + | - | 50 | 81 | 92 | 100 |
| 2 | 102 | 400 | 1,0% СН | 0,255 | - | + | - | 67 | 92 | 102 | 110 |
| 3 | 102 | 400 | 0,5% СН | 0,255 | - | + | - | 66 | 90 | 97 | 107 |
| 4 | 80 | 400 | 0,5% СП | 0,200 | 22 | + | - | 30 | 73 | 94 | 102 |
| 5 | 80 | 400 | 0,5% СН + 0,5% СП | 0,200 | 22 | + | - | 58 | 86 | 101 | 111 |
| 6* | 102 | 400 | - | 0,255 | - | + | - | 52 | 87 | 93 | 101 |

Окончание таблицы 2

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-----|-----|-----|----------------------|-------|----|---|---|----|-----|-----|-----|
| 7* | 102 | 400 | 1,0% СН | 0,255 | - | + | - | 67 | 89 | 99 | 104 |
| 8* | 102 | 400 | 0,5% СН | 0,255 | - | + | - | 66 | 86 | 99 | 103 |
| 9* | 80 | 400 | 0,5% СП | 0,200 | 22 | + | - | 35 | 78 | 94 | 101 |
| 10* | 80 | 400 | 0,5% СН + 0,5% СП | 0,200 | 22 | + | - | 59 | 89 | 101 | 110 |
| 11* | 102 | 400 | - | 0,255 | - | - | + | 57 | 88 | 94 | 103 |
| 12* | 102 | 400 | 1,0% СН | 0,255 | - | - | + | 68 | 89 | 101 | 109 |
| 13* | 102 | 400 | 0,5% СН | 0,255 | - | - | + | 67 | 88 | 100 | 105 |
| 14* | 80 | 400 | 0,5% СП | 0,200 | 22 | - | + | 37 | 80 | 95 | 107 |
| 15* | 80 | 400 | 0,5% СН + 0,5% СП | 0,200 | 22 | - | + | 60 | 89 | 101 | 116 |
| 16 | 84 | 400 | 1% УКД-1 | 0,210 | 18 | - | + | 64 | 99 | 119 | 121 |
| 17 | 82 | 400 | 1% УКД-1 | 0,205 | 20 | - | + | 67 | 108 | 127 | 145 |
| 18 | 82 | 400 | 1% УКД-1 | 0,205 | 20 | + | - | | | | 139 |
| 19 | 96 | 400 | 0,5% УКД-1 | 0,240 | 6 | + | - | | | | 121 |
| 20 | 88 | 400 | 0,75% УКД-1 | 0,220 | 14 | + | - | | | | 133 |
| 21 | 76 | 400 | 1,5% УКД-1 | 0,190 | 26 | + | - | | | | 148 |

* с нагревом за 1,5 часа до температуры 50°С и остыванием в бачке (~ 22 ч).

В развитие этих экспериментов на сериях образцов №№ 16...21 определили кинетику изменений (роста) прочности цементного камня при различающейся дозировке добавки «УКД-1» (№№ 18...21) и сроков ее хранения до применения (№16 – в течение года; №17 – 7...14 дней; №№18...21 – 45...60 суток). Из ряда этих образцов также готовили пробы для определения количества ХСВ и проведения рентгенофазового анализа (данные в статье не приведены).

Обобщение данных таблицы 2 позволяет сделать следующие выводы. Во-первых, очевидно, что ускоряющий компонент – добавка СН и комплексная, включающая СП + СН, обеспечивают стабильный рост прочности цементного камня. Но наибольшую эффективность проявляет комплексная добавка «УКД-1», содержащая эти компоненты и углеродный наноматериал, усиливающий действие сульфата натрия. Ее эффект проявляется в значительном повышении темпа роста прочности цементного камня за счет сочетания понижения водосодержания цементного теста и совокупного ускоряющего эффекта от сульфата натрия (имеющего химико-физическую природу и в итоге проявляющегося в уплотнении структуры цементного камня за счет взаимодействия в продуктах гидролиза-гидратации цемента [10-12]), а также от ультрадисперсных частиц УНМ, проявляющих эффект «центров кристаллизации [10], что способствует ускоренному формированию (и в большом количестве) кристаллогидратных новообразований, а в итоге – росту прочности цементного камня [13, 14].

Эффективность вещества УНМ подтверждается сопоставлением результатов экспериментов №5; №15* (введена комплексная добавка: 0,5% СП + 0,5% СН, т.е. 1% этой добавки от МЦ) и №16; №18 (содержит 1% «УКД-1»). При практически равном начальном водосодержании ($K_{НГ} \sim \text{const}$) цементного теста (снижение за счет пластифицирующего эффекта этих добавок) прочность образцов с «УКД-1» к 28 суткам была выше на ~28% (№5 и №8) и на ~15% (№15 и №16), при прочих равных условиях. Это подтверждает предположение об усилении веществом УНМ действия ускорителя твердения – сульфата натрия, входящего в состав комплексной добавки «УКД-1».

Активность цемента (по темпу роста прочности и значению в 28 суток) и ее изменение для цементов разных групп эффективности (I, II и III-ей; таблица 1) под влиянием ускоряющего компонента (СН), пластифицирующего компонента (СП) и комплексной добавки без углерод-

ного компонента (К), а также содержащей УНМ в составе – «УКД-1», экспериментально исследовали по методике ГОСТ 310.3-76 [5] определения активности цемента. То есть, на образцах – балочках, размерами 40x40x160 мм, приготовленными из цементно-песчаного раствора состава Ц:П=1:3, консистенция которого была принята «const» и характеризовалась распылом конуса $\sim \pm 10$ мм при изменяющемся количестве воды затворения.

Из полученных экспериментальных данных (таблица 3) следует, что введение сульфата натрия (СН) интенсифицирует темп роста прочности мелкозернистого бетона во все исследуемые сроки наиболее благоприятного водного твердения; увеличение дозировки «СН» с 0,5 до 1,5 % от МЦ сопровождается ростом прочности в 1, 2, 3 и 7 суток соответственно на 25...70 %; 20...60 %; 15...40 % и 15...30 %. При этом ее относительные прирост несколько выше для цемента III и II группы активности соответственно в сравнении с I группой. Очевидна тенденция к снижению эффективности действия ускорителя твердения с увеличением времени твердения: к 28 суткам прирост прочности для 0,5...1,5 % дозировки «СН» составляет 5...12 %.

Таблица 3 – Кинетика роста прочности цементно-песчаного раствора (мелкозернистого бетона)

| № цемента по таблице 1 | Количество и вид добавки | Прочность на сжатие (МПа) в возрасте, сут | | | | |
|------------------------|--------------------------|---|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 7 | 28 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | - | 12,1 | 22,6 | 28,5 | 38,9 | 53,0 |
| 1 | 0,5 % СН | 15,0 | 27,8 | 32,0 | 42,8 | 54,2 |
| 1 | 1,0 % СН | 18,8 | 32,5 | 38,5 | 48,8 | 57,4 |
| 1 | 1,5 % СН | 20,6 | 36,1 | 39,0 | 51,2 | 59,1 |
| 1 | 0,35 % СП | 9,8 | 22,8 | 31,8 | 42,5 | 56,5 |
| 1 | 0,5% СП | 11,5 | 23,4 | 35,0 | 47,9 | 59,5 |
| 1 | 0,65 % СП | 12,4 | 26,9 | 39,5 | 52,2 | 63,8 |
| 1 | 0,8% СП | 12,7 | 29,0 | 40,1 | 53,0 | 64,5 |
| 1 | 0,35 + 0,65% К | 17,8 | 33,1 | 41,6 | 53,5 | 64,9 |
| 1 | 1,0% «УКД-1» | 21,2 | 38,5 | 43,8 | 56,8 | 69,9 |
| 6 | - | 8,6 | 15,5 | 22,7 | 35,8 | 49,6 |
| 6 | 1 % СН | 14,5 | 25,2 | 38,0 | 42,9 | 53,5 |
| 6 | 0,65% СП | 10,5 | 24,4 | 38,9 | 47,0 | 58,5 |
| 6 | 1,0% «УКД-1» | 15,8 | 28,9 | 36,3 | 48,8 | 60,6 |
| 3 | - | 8,0 | 14,4 | 20,9 | 33,3 | 48,0 |
| 3 | 1 % СН | 13,2 | 19,8 | 25,0 | 40,5 | 50,8 |
| 3 | 0,65% СП | 9,8 | 17,9 | 24,4 | 41,8 | 54,7 |
| 3 | 1,0% «УКД-1» | 14,6 | 21,2 | 29,0 | 45,8 | 56,8 |
| 7 | - | 6,0 | 13,8 | 18,1 | 29,5 | 42,0 |
| 7 | 1 % СН | 11,2 | 18,0 | 22,8 | 36,9 | 45,4 |
| 7 | 0,65% СП | 8,7 | 17,5 | 22,0 | 41,0 | 50,5 |
| 7 | 1,0% «УКД-1» | 12,4 | 19,9 | 26,7 | 44,4 | 52,0 |
| 4 | - | 5,5 | 12,4 | 17,4 | 27,7 | 49,5 |
| 4 | 1 % СН | 9,5 | 17,0 | 23,6 | 34,4 | 43,0 |
| 4 | 0,65 % СП | 8,4 | 14,9 | 20,5 | 36,2 | 47,5 |
| 4 | 1,0% «УКД-1» | 10,0 | 19,0 | 26,6 | 40,2 | 48,2 |

Добавка «СП», сдерживая развитие гидратационного процесса цемента, замедляет темп роста прочности мелкозернистого бетона в первые сутки (относительно раствора без добавки) и в 1...3 суток, в сравнении с добавкой «СН». Значительное снижение начального водосодержания раствора равной консистенции, что обеспечивает введение «СП», выражается в росте его прочности с 3...7 суток. К 28 суткам твердения в воде активность цемента с 0,35...0,8 % «СП» повышается до 12...22 %.

Комплексная добавка (0,35%+0,65% К) без углеродного наноматериала в начальные сроки практически не уступает ускорителю твердения «СН» в дозировке 1%, превосходя его к 3...28 суткам твердения, и выигрывая у пластификатора «СП» в первые 1...3 суток, не уступает ему к 7...28 суткам твердения.

Комплексная добавка «УКД-1» в дозировке 1% по величине проявляемого эффекта практически превосходит в 1...3 сутки эффект наибольшей дозировки «СН» (в 1,5 %), а в 7...28 сутки – дозировки добавки «СП» (в 0,65 %), так и комплексной без углеродного наноматериала. Она обеспечивает снижение водосодержания мелкозернистого бетона за счет пластифицирующего воздействия в сочетании с активизацией гидратации и твердения цемента веществами СН и УНМ, что полностью согласуется с данными предыдущего раздела. В результате эффективность воздействия комплексной добавки, содержащей углеродный наноматериал, выше, чем каждого из составляющих компонентов, дозируемых как монодобавка в большем количестве, или комплексная добавка, но не содержащая УНМ.

Следует отметить несколько возрастающий в ранние сроки твердения эффект от введения добавок «УКД-1» и «СН» в цемент меньшей активности (т.е. большей группы эффективности). Так, для цемента № 1 (I группа эффективности) и №4 (III группа) прирост прочности в 1...3 сутки составляет соответственно 55...36% и 70... 36 %.

На следующем этапе исследований выполнены эксперименты по выявлению закономерностей влияния добавок на твердение цемента (цементно-песчаного раствора или мелкозернистого бетона) при паропрогреве по стандартизированному (ГОСТ 310.3-76 [5]) режиму (выдержка – 2 ч; подъем температуры до 80 ± 5 °С – 3 ч; изотермический прогрев – 6ч; остывание в пропарочном бачке – 2ч) при испытании образцов-балочек в возрасте 23...24 ч на изгиб и сжатие, а также по режимам, включающим разогрев бетона и последующее остывание в пропарочном бачке (термос).

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

Из результатов исследований (таблица 4) следует, что с введением всех исследованных видов добавок темп роста прочности бетона при пропаривании возрастает. В случае использования «СН» эффект основывается на ускорении процессов гидратации и твердения цемента; при введении «СП» – за счет снижения водосодержания бетона; для комплексных добавок – от сочетания означенных эффектов.

Таблица 4 – Влияние добавок на прочность цемента при паропрогреве

| № цемента по таблице 1 | Количество (%) и вид добавки | Режим прогрева, ч | | | Прочность образцов, МПа, к 24 ч | |
|------------------------|------------------------------|--------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------------|-----------|
| | | подъем температуры | изотермический прогрев | остывание вместе с бачком | на изгиб | на сжатие |
| 1 | – | 3 (80°С) | 6 | 2 | 4,9 | 34,8 |
| 1 | 1 % СН | 3 (80°С) | 6 | 2 | 5,3 | 38,6 |
| 1 | 1 % СН | 3 (80°С) | термос | 16 | 5,0 | 41,6 |
| 1 | 1 % СН | 3 (60 °С) | термос | 16 | 5,6 | 42,8 |
| 1 | 1 % СН | 2 (40 °С) | термос | 17 | 5,5 | 40,0 |
| 1 | 0,65 % СП* | 3 | 6 | 2 | 5,6 | 42,8 |
| 1 | 0,65 % СП | 3 (60 °С) | термос | 16 | 5,2 | 41,7 |
| 1 | 0,65 % СП | 2 (40 °С) | термос | 17 | 4,9 | 38,5 |

Окончание таблицы 4

| | | | | | | |
|---|---------------|-----------|--------|----|-----|------|
| 1 | 0,35+0,65 % К | 2 (40 °С) | термос | 17 | 6,1 | 43,0 |
| 1 | 1% «УКД-1» | 2 (40 °С) | термос | 17 | 6,4 | 46,1 |
| 3 | – | 3 | б | 2 | 4,7 | 31,3 |
| 3 | 1% СН | 3 (60 °С) | термос | 16 | 5,5 | 43,0 |
| 3 | 1 % СН | 2 (40 °С) | термос | 17 | 5,0 | 39,1 |
| 3 | 1% «УКД-1» | 2 (60 °С) | термос | 16 | 6,2 | 46,2 |
| 4 | – | 3 | б | 2 | 3,6 | 22,0 |
| 4 | 1% СН | 3 (80 °С) | термос | 16 | 5,1 | 38,8 |
| 4 | 1 % СН | 3 (60 °С) | термос | 16 | 4,7 | 32,5 |
| 4 | 1% «УКД-1» | 3 (60 °С) | термос | 16 | 5,3 | 41,3 |
| 4 | 1% «УКД-1» | 2 (40 °С) | термос | 17 | 5,7 | 32,0 |

* со снижением расхода воды при введении добавки «СП» и комплексов «0,35 + 0,65% К» и «УКД-1».

Наибольший эффект роста прочности показали образцы мелкозернистого бетона с добавкой «УКД-1» для всех вариантов использованного цемента (I, II и III групп эффективности) и равнозначных режимов прогрева или разогрева бетона. Так, при разогреве бетона на цементе I группы до 40 °С, в сравнении с ускоряющим компонентом (1% СН) прочность на сжатие выросла на ~15%, с пластифицирующим (0,65% СП) – на ~19% и с комплексной без углеродного наноматериала – на ~7,5%.

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

Очевидно, что введение добавки «УКД-1» эффективно для всех видов использованных вяжущих. Со снижением их активности (№4) необходим начальный разогрев до более высокой температуры. Например, в этом случае прочность образцов с добавкой «СН» оказалась выше при нагреве до 80 °С. Отметим, что она нормально повышалась при последующем их дозревании в воде, составив к 28 суткам 43...46 МПа, т.е. превысив на 10 % номинальную марку цемента «400».

Использование монодобавки «СП» в варианте твердения бетона «разогрев-термос» менее эффективно, чем «СН» и тем более – «УКД-1». Это следствие ее действия, проявляющегося в замедлении реакций гидратации цемента и вызывающего снижение темпа роста прочности образцов в начальный период.

В целом полученные результаты свидетельствуют о том, что введение добавки «УКД-1» повышает темп роста прочности мелкозернистого бетона, обеспечивает при кратковременном (за 2...3 ч) нагреве до температуры 40...60 °С и последующем твердении по методу термоса (16...17 ч) прочность цементно-песчаных образцов стандартизированного состава и консистенции в 70...90 % от номинальной марки цемента, т.е. базу для разработки энергосберегающей технологии бетона для строительных работ.

Одновременно были подтверждены данные источников [6, 8, 9] о том, что при последующем твердении в условиях термоса следует ограничивать разогрев бетона с ускоряющими его твердение добавками, приготовленного на цементе I группы эффективности, $t \sim 40...50^\circ\text{C}$. Так, при разогреве образцов бетона с 1% СН и «УКД-1» до 60 °С (и тем более до 80 °С) и дальнейшим твердением их после распалубки до 28 суток в нормально-влажных условиях прочность их оказалась ниже, чем прочность разогретых до 40 °С при прочих равных условиях. В приведенных источниках это явление объяснено тем, что для цементов с высоким содержанием «С₃S + С₃A» (как это имеет место для цемента №1 по таблице 1) начальный нагрев до $t > 40...45^\circ\text{C}$ оптимален. Превышение этого уровня температуры (с учетом дополнительного разогрева бетона за счет экзотермии цемента) сопровождается чрезмерным ускорением гидролизно-гидратационного процесса в присутствии ускоряющей твердение добавки. В результате вокруг цементных частиц ускоренно формируется плотная и трудно проницаемая для воды реакционная каемка из продуктов гидратации цемента, затрудняющая (или вовсе тормозящая) развитие этого процесса. Как следствие, прочность бетона быстро растет в период теплового воздействия в начальные сроки твердения, но резко замедляет (или вовсе прекращает) свой рост в дальнейшем. Кроме этого, повышение температуры разогрева требует, соответственно, больших энергетических затрат, которые в этом случае не оправданны.

Влияние активности цемента на кинетику твердения бетона. Взаимосвязь темпа роста прочности цементного бетона в разных условиях и минералогического состава вяжущего (в частности, с повышением содержания в клинкере C_3S , C_3A) общеизвестна [8, 9, 15-18]. Но оперировать минералогическим составом на практике не представляется возможным. В этой связи рационально использовать дополнительные характеристики вяжущего – группы эффективности цемента (при работе по ГОСТ 10178-85 [19] и использовании цемента по маркам (активности)), либо прочность в раннем (2 суток) возрасте по СТБ EN 197-1-2007 [20].

В экспериментах использовали составы бетона, приведенные в таблице 5.

Таблица 5 – 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 (3)* | C ¹² / ₁₅ | 12...14 | M400 | 380 | 685 | 1100 | 201 | 0,53 | 1,60 |
| 2 (5) | C ²⁵ / ₃₀ | 12...14 | M500 | 465 | 590 | 1090 | 208 | 0,45 | 1,42 |
| Б. Составы с добавкой 1% СН | | | | | | | | | |
| 3 (8) | C ¹² / ₁₅ | 12...14 | M400 | 360 | 720 | 1100 | 182 | 0,50 | 1,44 |
| 4 (10) | C ²⁵ / ₃₀ | 12...14 | M500 | 442 | 625 | 1100 | 195 | 0,44 | 1,38 |
| В. Составы с комплексной добавкой 1% «УКД-1» | | | | | | | | | |
| 5 (13) | C ¹² / ₁₅ | 12...14 | M400 | 340 | 715 | 1150 | 163 | 0,48 | 1,32 |
| 6 (14) | C ¹² / ₁₅ | 21...23 | M400 | 405 | 720 | 1065 | 180 | 0,44 | 1,27 |
| 7 (15) | C ²⁵ / ₃₀ | 12...14 | M500 | 345 | 725 | 1175 | 146 | 0,42 | 1,2 |

В таблице 6 приведены результаты исследований, отражающие влияние активности цемента (марка M400, $R_y = 42$ МПа; M500, $R_y = 49$ МПа; M550, $R_y = 56$ МПа) и его эффективности при пропаривании (I, II и III-я группы) на кинетику роста прочности бетона в нормально-влажностных условиях на примере состава №1 по таблице 5.2 (C¹²/₁₅; ОК ~ 12...14 см). Для получения сопоставимых данных одну партию образцов (№№ 1...3) готовили на цементе марки M400 I, II и III групп активности (№№ 2, 7 и 4 по таблице 1), а вторую (№№ 1, 4 и 5) на вяжущем I группы эффективности разных марок, т.е. M400, M500 и M550 (домолотый), при постоянном расходе вяжущего на 1 м³ бетона, равном 380 кг (в серии – 3 шт; внутрисерийный коэффициент вариации ≤ 8%).

Из полученных данных следует, что как повышение марки или активности цемента, оцениваемой по прочности на сжатие, так и повышение его активности через эффективность при пропаривании (фактически – за счет повышения доли минералов C_3S и C_3A (см. таблицу 1) в его составе) или за счет увеличения тонкости помола (домолотый цемент исходной активности $R_y = 49$ МПа, приобретенной – $R_y = 56$ МПа), способствуют увеличению темпа роста прочности бетона при естественных условиях твердения.

Таблица 6 – Влияние активности цемента и эффективности при пропаривании на темп роста прочности бетона

| Порядковый номер состава | Характеристика цемента | | Прочность бетона в % от $f_{cm, 28}$ в возрасте | | | | | Прочность бетона в 28 суток, МПа |
|--------------------------|------------------------|----------------------|---|----|----|----|----|----------------------------------|
| | марка | группа эффективности | 1 | 2 | 3 | 4 | 7 | |
| 1 | 400 | I | 29 | 46 | 55 | 67 | 81 | 28,2 |
| 2 | 400 | II | 24 | 40 | 51 | 65 | 75 | 26,5 |
| 3 | 400 | III | 20 | 35 | 47 | 58 | 70 | 25,8 |
| 4 | 500 | I | 32 | 49 | 59 | 70 | 83 | 30,6 |
| 5 | 550 | I | 35 | 52 | 63 | 72 | 84 | 32,0 |
| 6 | 500* | I | 29 | 45 | 56 | 69 | 80 | 26,0 |
| 7 | 550** | I | 31 | 46 | 57 | 69 | 81 | 26,5 |

Примечания:

1. * – расход цемента на 1 м^3 соответствовал 350 кг;
2. ** – расход цемента на 1 м^3 соответствовал 330 кг.

Группа эффективности оказывает существенное влияние на кинетику твердения бетона в 1...2 суток, которое (серии №№ 1...3) при переходе от цемента М400 III группы к вяжущему М400 I группы оценивается приростом прочности до 45...25% соответственно. В более поздние сроки эффект снижается и к 28 суткам твердения бетона составляет 9...10%.

Изменение марки цемента от М400 до М550 при равном расходе вяжущего I группы эффективности характеризуется менее значительным повышением темпа твердения бетона в раннем возрасте и оценивается (№№ 1, 4 и 5) для 1...2 суток – 20% и к 28 суткам – 13%. Следовало ожидать, что снижение содержания цемента высоких марок в бетоне (но до уровня, обеспечивающего расчетную прочность класса $C^{12}/_{15}$) будет сопровождаться и понижением темпа роста прочности бетона. Это подтверждено данными о кинетике твердения бетона образцов серий №6 и №7 (М500 и М550) в сравнении с результатами серии №1 (М400).

Таким образом, повышение темпа твердения (роста прочности) бетона по варианту беспрогревной технологии путем применения цемента более высоких марок фактически сопровождается его перерасходом (по критерию обеспечения проектной прочности). Более рационально использовать для этой цели вяжущие меньшей марки (класса), но I группы эффективности (либо с маркировкой «R» при работе с цементами по СТБ EN197-1-2007 [20]).

Заключение. Результаты экспериментальных исследований свойств цементного камня и бетона под влиянием добавки «УКД-1» и составляющих ее компонентов в зависимости от активности цемента позволяют сделать следующие выводы.

Выявлен рост прочности цементного камня на 20...40% при введении 0,75...1,0% «УКД-1» за счет эффектов снижения начального водосодержания и ускорения твердения цемента под комплексным влиянием углеродных наноматериалов и сульфата натрия, взаимно дополняющих этот эффект.

Установлен рост прочности образцов до ~30% мелкозернистого бетона (цементно-песчаного раствора стандартного состава) с 1% добавки «УКД-1» при водном твердении 28 суток, и сразу после прогрева. При этом образцы без добавки пропаривали по режиму: 2 + 3 (до 80°C) + 6 (изотермия) + 3 (остывание), а с добавкой – нагрев до 40°C за 2 ч при дальнейшем твердении в утепленном устройстве без подвода тепла («термосные» условия).

Экспериментально подтверждена более высокая эффективность (с позиций ускоренного роста прочности бетона в 1...3 суток «нормального» твердения) цементов с повышенным суммарным содержанием « C_3S+C_3A », соответствующим I группе эффективности при пропаривании. Сделан вывод, что данный фактор более значим, чем показатель марки цемента, с позиций минимизации его расхода в бетонах, твердеющих в естественных условиях.

Список источников

1. СТБ 1112-98. Добавки для бетонов. Общие технические условия. – Мн.: Стройтехнорм, 1999. – 23 с.
2. ГОСТ 21458-75 Сульфат натрия кристаллизационный. Технические условия. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1975 г.
3. ТУ 5730-004-97474489-2007 Суперпластификатор «Суперпласт С-3», – М.: 2007. – 9 с.
4. Техническое свидетельство пригодности материалов и изделий для применения в строительстве. ТС 01.2093.14. Комплексная добавка для бетона «УКД-1». Дата регистрации: 10.01.2014 г. Действительно до 10.01.2019 г. Выдано РУП «Сройтехнорм» Минстройархитектуры РБ. – 8 с (с приложениями).
5. ГОСТ 310.3-76. Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема. – М.: Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1978. – 9 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. Ратников, В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат, 1989. – 186 с.
11. Батраков, В.Г. Модифицированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1990. – 400 с.
12. Тейлор, К. Химия цемента. – Перевод с английского. – М.: МИР, 1986. – С. 174-276; 300-319; 418-429.
13. Батяновский, Э.И., Рябчиков П.В., Якимович В.Д. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента. XVI Межд. науч.-метод. Семинара/ Под общ. ред. П.С. Пойты, В.В. Тура. – Брест: БрГТУ, 2009. – ч. 2. – С. 136.
14. Батяновский, Э.И., Крауклис А.В., Самцов Петр П., Рябчиков П.В., Самцов Павел П. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня. Научно-технический журнал «Строительная наука и техника». – 2010. – №1-2(28-29). – С. 3-10.
15. Миронов, С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. – М.: Стройиздат, 1975. – 700 с.
16. Ахведов, И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
17. Волженский, А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества: Учебник для вузов. Издание 4-е, переработанное и дополненное. – М.: Стройиздат, 1986. – 476 с.
18. Ахвердо, в И.Н. Высокопрочный бетон. – М.: Госстройиздат, 1961. – 163 с.
19. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – М.: Министерство промышленности строительных материалов СССР, 1987. – 7 с.
20. СТБ EN 197-1-2007. Цемент. Часть 1. Состав, технические требования и критерии соответствия общих цементов. – Мн.: РУП «Стройтехнорм», 2007. – 29 с.