

Шейда Ольга Юрьевна, аспирант, УО «Белорусский национальный технический университет», г. Минск (Беларусь)

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

ФОРМОВОЧНЫЕ СВОЙСТВА БЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ДОБАВКОЙ «УКД-1», СОДЕРЖАЩЕЙ УГЛЕРОДНЫЙ НАНОМАТЕРИАЛ

MOLDING PROPERTIES OF CONCRETE MIXTURES WITH ADDITIVES «ССА-1» CONTAINING CARBON NANOMATERIAL

АННОТАЦИЯ

Материал статьи отражает результаты исследований изменения во времени формуемости бетонных смесей под влиянием новой химической добавки в бетон «УКД-1», представляющей собой трехкомпонентное твердофазное сухое вещество, в состав которого входят пластифицирующий (СП) и ускоряющий (СН) твердение бетона компоненты, а также структурированный углеродный наноматериал (УНМ), усиливающий действие ускоряющего твердение бетона компонента. Исследуемая добавка решает проблему равномерного распределения в объеме бетона малых количеств углеродного наноматериала (вводимого в количестве 0,05...0,0005 % в пересчете на массу цемента), который оказывает интенсифицирующее действие на процессы гидролиза-гидратации цемента, чем обеспечивает рост плотности и прочности цементного камня и бетона. Целью исследований являлось установление закономерностей изменения формуемости (осадки конуса) подвижных бетонных смесей с добавкой «УКД-1» во времени в зависимости от изменяющихся факторов: свойств цемента, температуры, условий транспортирования, для разработки соответствующих рекомендаций по использованию этой новой добавки в монолитном бетоне. При выполнении экспериментальных исследований использовали стандартизированные методы испытаний. В результате установлено, что влияние добавки «УКД-1» на сохранение формовочных свойств бетонных смесей подчиняется общим закономерностям, характерным для входящих в ее состав пластифицирующего и ускоряющих твердение бетона веществ, и определена допустимая продолжительность транспортирования смесей с этой добавкой в диапазоне температуры от 0...5°C до 25...30°C, что обеспечивает необходимые условия для ведения бетонных работ.

ABSTRACT

The material reflects the results of studies of the time variation of the formability of concrete mixtures under the influence of a new chemical additive in concrete «CCA-1», which is a three-component solid-phase dry matter, which is composed of a plasticizing (SP) and accelerating (SN) concrete hardening components, as well as structured carbon nanomaterial (CNM), the reinforcing effect of accelerating the hardening of the concrete component. The investigated additive solves the problem of uniform distribution in the volume of concrete of small amounts of carbon nanomaterial (entered in the amount of 0,05...0,0005 % in recalculation on weight of cement), which has a stimulating effect on the processes of hydrolysis-hydration of the cement, which ensures growth density and strength of cement stone and concrete. The aim of this study was to establish patterns of change in formability (slump) of flowable concrete mixtures with the addition of «CCA-1» in time depending on the varying factors: the properties of the cement, the temperature conditions of transportation, and to develop appropriate recommendations for the use of this new additive in monolith concrete. In carrying out experimental studies using standardized test methods. As a result, found that the influence of the additive «CCA-1» for the preservation of the molding properties of concrete mixtures follows the general laws specific to its constituent plasticizing and accelerating the hardening of concrete materials, and defined the permissible duration of transportation with this additive mixtures in the temperature range from 0 ... 5 °C to 25 ... 30 °C, that provides the necessary conditions for year-round maintenance of concrete work.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие в Беларуси производства структурированных углеродных наноматериалов (УНМ) [1-3], а также накопленные данные об эффективности их применения в цементном бетоне [4-8] поставили на повестку дня необходимость их практического использования. С учетом того, что эффективность УНМ проявляется в ускорении твердения и повышении прочности бетона в малых дозировках (0,05...0,0005% от массы цемента), одним из направлений применения УНМ явилось введение их в состав комплексной химической добавки в бетон с целью усиления действия ускоряющего его твердение компонента. Одновременно этот компонент способен «адсорбировать» своей поверхностью дисперсные частицы углеродного наноматериала, имеющие положительный заряд, обеспечивая тем самым равномерное распределение малых количеств УНМ в объеме цементного теста на стадии приготовления бетона. С появлением новой добавки «УНМ-1» на рынке Беларуси потребовалось проведение исследований ее эффективности в бетоне и, в частности,

ее влияния на свойства цемента, технологические свойства бетонных смесей, кинетику твердения и свойства бетона. Основные результаты исследований влияния добавки «УКД-1» на сохранение формовочных свойств бетонных смесей разной исходной подвижности при изменении температуры и условий хранения (транспортирования), представленные в настоящей статье, обеспечивают достижение цели, заключающейся в разработке рекомендаций по транспортированию бетонных смесей с добавкой «УКД-1» для монолитного строительства при круглогодичном ведении бетонных работ.

Влияние различных факторов на формовочные свойства бетонной смеси

Составы бетона для исследований. В таблице 1 приведены исходные данные по составам и свойствам бетонных смесей и приготовленного из них бетона, которые использовались в исследованиях. Дозировка химических добавок (исследуемой «УКД-1» и принятой для сравнения – сульфата натрия (Na_2SO_4 , СН), который входит в комплекс «УКД-1» в качестве ускорителя твердения) принята соответствующей 1% от массы цемента (МЦ) по сухому веществу как наиболее рациональная; для сульфата натрия – по рекомендациям источников [9, 10], а для «УКД-1» – по собственным исследованиям автора, приведенным в источнике [11].

Во всех вариантах, приведенных в таблице 1, начальную (исходную) подвижность (жесткость) бетонных смесей определяли через 15 минут после выгрузки их из смесителя (СТБ 1035-96, п. 5.2. [12]). При исследованиях влияния означенных во введении факторов на изменение формуемости бетонных смесей во времени в лабораторном смесителе принудительного принципа действия готовили замес объемом в 30 л и определяли через каждые 15 минут осадку конуса (жесткость) на 2-х пробах из данного объема. Смесь проб затем объединяли с оставшимся на поддоне объемом бетона и в течение 60 секунд усредняли. До очередного определения смесь хранилась неподвижно, а непосредственно перед ним ее перемешивали в течение 60 секунд. Исключение составляли исследования изменения формуемости бетонных смесей в статическом состоянии. В этих случаях готовили смесь объемом замеса 20 л, выгружали на поддон и выполняли 2 определения на разных объемах пробы через установленный период времени, перемешивая 10...15 секунд пробу непосредственно перед испытанием.

Характеристики бетонных смесей и бетона

| № п/п | Класс бетона | Формуемость бетонной смеси | | Марка цемента | Расход составляющих (кг) на 1 м ³ бетона | | | | Средняя плотность, кг/м ³ | Водоцементное отношение бетона |
|--|--------------|----------------------------|----------|---------------|---|-----|----------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------|
| | | «Ж», с | «ОК», см | | Ц | П | Ш _ц | В | | |
| А. Составы без добавок | | | | | | | | | | |
| 1 | C12/15 | 7...8 | - | M400 | 245 | 760 | 1230 | 155 | 2390 | 0,63 |
| 2 | C12/15 | - | 3...4 | M400 | 275 | 765 | 1200 | 160 | 2400 | 0,58 |
| 3 | C12/15 | - | 12...14 | M400 | 380 | 685 | 1100 | 201 | 2365 | 0,53 |
| 4 | C25/30 | - | 3...4 | M500 | 385 | 620 | 1180 | 176 | 2350 | 0,46 |
| 5 | C25/30 | - | 12...14 | M500 | 465 | 590 | 1090 | 208 | 2350 | 0,45 |
| Б. Составы с добавкой 1 % СН от МЦ | | | | | | | | | | |
| 6 | C12/15 | 7...8 | - | M400 | 235 | 740 | 1280 | 145 | 2400 | 0,62 |
| 7 | C12/15 | - | 3...4 | M400 | 270 | 738 | 1230 | 147 | 2380 | 0,56 |
| 8 | C12/15 | - | 12...14 | M400 | 360 | 720 | 1100 | 182 | 2370 | 0,50 |
| 9 | C25/30 | - | 3...4 | M500 | 364 | 670 | 1185 | 161 | 2380 | 0,44 |
| 10 | C25/30 | - | 12...14 | M500 | 442 | 625 | 1100 | 195 | 2360 | 0,44 |
| В. Составы с добавкой 1% «УКД-1» от МЦ | | | | | | | | | | |
| 11 | C12/15 | 7...8 | - | M400 | 220 | 825 | 1240 | 122 | 2410 | 0,55 |
| 12 | C12/15 | - | 3...4 | M400 | 247 | 785 | 1250 | 130 | 2415 | 0,52 |
| 13 | C12/15 | - | 12...14 | M400 | 340 | 755 | 1150 | 163 | 2380 | 0,48 |
| 14 | C12/15 | - | 21...23 | M400 | 405 | 720 | 1065 | 180 | 2370 | 0,44 |
| 15 | C25/30 | - | 12...14 | M500 | 345 | 725 | 1175 | 145 | 2395 | 0,42 |
| 16 | C25/30 | - | 21...23 | M500 | 420 | 720 | 1065 | 175 | 2380 | 0,41 |
| 17 | C32/40 | - | 12...14 | M500 | 400 | 695 | 1150 | 156 | 2405 | 0,39 |

Влияние температуры. В экспериментах принят диапазон температуры бетонной смеси тяжелого конструкционного бетона от 5°C до 30°C, как наиболее характерный для климатической зоны Беларуси при круглогодичном ведении работ, включая требования к температуре смесей ТКП 45-5.03-21-2006 [13] для зимнего периода работ.

В таблице 2 приведены данные об изменении формуемости бетонной смеси (во всех случаях среднее по 2-м определениям здесь и далее) составов (по таблице 1) №№ 2, 7, 12 (низкопластичная смесь) и №№ 5, 10, 16, 17 (пластичная и литая (по СТБ 1035-96) [12] 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...8)°C; (12...15)°C и (18...22)°C; при $t_{нв} = (25...30)$ °C температура смеси

начальная равнялась (18...20)°С. В последнем случае объем пробы бетона на период ожидания в процессе эксперимента укрывали жестким паронепроницаемым колпаком. Указанные диапазоны температуры обеспечивали, выполняя эксперименты в разные периоды весны-лета 2013 г. При этом сухие приготовленные смеси при температуре (5...8)°С предварительно охлаждали, а при $t = (25...30)^\circ\text{C}$ – подогревали примерно до средней температуры указанного диапазона. Естественная температура среды соответствовала указанной в конкретных вариантах эксперимента.

Данные таблицы 2 подтверждают прямую зависимость ухудшения формуемости бетонной смеси и с добавками, и без них с повышением температуры смеси и окружающей среды. Влияние на этот процесс добавок также нарастает с повышением температуры.

Исследуемая комплексная добавка, введенная в низкопластичную смесь (состав № 12), за счет пластификатора СП оказывает стабилизирующее действие на процесс снижения подвижности, несмотря на уменьшение начального водосодержания смеси и водоцементного отношения бетона. Эффект стабилизации сохраняется до 90...60 минут для пластичной массы (состав № 13 и № 17) и до 30 минут в литой смеси (№ 16), а затем снижение формуемости прогрессирует, особенно с ростом температуры до 25...30 °С. Очевидна ускоренная потеря подвижности смеси с добавкой СН, отражающая повышение темпа развития реакций гидратации цемента и связывания вяжущим воды затворения.

Если сравнить динамику изменения формуемости низкопластичной смеси (П1, составы №№ 2. 7 и 12), пластичной (П3, №№ 5 и 10) и литой (П5, состав № 16), то с ростом температуры с более высоким темпом она снижается для литой смеси, затем – для пластичной. Низкопластичная смесь характеризуется относительно низким темпом потерь формуемости в диапазоне температур 5...30 °С.

Обобщая данные таблицы 2, приходим к выводу, что с введением в бетон комплексной добавки 1% «УКД–1» от МЦ период сохраняемости формовочных свойств зависит от температуры смеси и окружающей среды и составляет для низкопластичных смесей период до 120...90 мин при температуре 5...30°С соответственно (по критерию снижения «остаточной» осадки конуса, но не менее 1 см); для пластичных бетонных смесей с добавкой 1% «УКД–1» (состав № 13) период их сохранности соответствует до 90 минут для $t_{\text{нв}} \sim (5...8)^\circ\text{C}$, до 75 минут для $t_{\text{нв}} \sim (12...15)^\circ\text{C}$, до 60 минут для $t_{\text{нв}} \sim (20...30)^\circ\text{C}$. Сохраняемость свойств литой бетонной смеси, полученной с применением добавки «УКД–1», в пределах марки П5 сохраняется до 30 минут при $t_{\text{нв}} \sim (5...15)^\circ\text{C}$ и 15... 20 минут при $t_{\text{нв}} \sim (20...30)^\circ\text{C}$.

Таблица 2

Влияние температуры на изменение формуемости бетонных смесей

| Номер состава бетона по таблице 1 | Наличие и вид примененной добавки | Изменение формуемости бетонной смеси (ОК, см) за период (в мин) от момента приготовления: | | | | | | | |
|--|-----------------------------------|---|------|------|------|-----|-----|-----|-----|
| | | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 | 105 | 120 |
| А. при $t_{нв} = 5...8 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | |
| 2 | - | 3,5 | 3 | 3 | 2,5 | 2 | 2 | 1,5 | 1 |
| 7 | СН | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 |
| 12 | «УКД-1» | 4 | 3,5 | 3 | 3 | 2,5 | 2,0 | » 2 | 1,5 |
| 5 | - | 12 | 11,5 | 11 | 10 | 8 | 6,5 | 5,5 | 5 |
| 10 | СН | 13 | 12 | 11,5 | 10 | 8 | 5,5 | 4,5 | 2 |
| 13 | «УКД-1» | 14 | 13,5 | 13,5 | 12 | 11 | 10 | 8 | 5 |
| 16 | «УКД-1» | 22 | 21 | 18 | 15 | 12 | 9 | 6,5 | 4 |
| 17 | «УКД-1» | 13 | 13 | 12 | 11 | 11 | 9 | 3,5 | 2,5 |
| Б. при $t_{нв} = 12...15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | |
| 2 | - | 3,5 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1,5 | 1 | 0,5 |
| 7 | СН | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 | 1,5 | 1,0 | 0,5 | - |
| 12 | «УКД-1» | 4 | 3,5 | 3 | » 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 |
| 5 | - | 12 | 11 | » 11 | 10 | 8,5 | 6,5 | 5 | 4 |
| 10 | СН | 13 | 12,5 | 10,5 | 9,5 | 7 | 3 | 1 | - |
| 13 | «УКД-1» | 14 | 13 | 12,5 | 11 | 10 | 8,5 | 7,5 | 6 |
| 16 | «УКД-1» | 22 | 21 | 17,5 | 13,5 | 9,5 | 7 | 4,5 | 2 |
| 17 | «УКД-1» | 14 | 13 | 12 | 10 | 9 | 7 | 5 | 3 |
| В. при $t_{нв} = 18...22 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | |
| 2 | - | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | » 1 | 0,5 | - |
| 7 | СН | 4 | 3,5 | 3 | 2 | 1,5 | 0,5 | - | - |
| 12 | «УКД-1» | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 |
| 5 | - | 12 | 11 | 10 | 8 | 6 | 4,5 | 4 | 3 |
| 10 | СН | 14 | 13 | 11 | 9 | 5 | 3,5 | 1,5 | - |
| 13 | «УКД-1» | 14 | 13 | 12 | 10,5 | 8 | 6,5 | 5 | 4 |
| 16 | «УКД-1» | 22 | 20 | 16 | 10 | 6,5 | 4 | 2,5 | 0,5 |
| 17 | «УКД-1» | 13 | 11 | 11 | 8 | 6 | 2,5 | 0,5 | - |
| Г. при $t_{нв} = 25...30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ | | | | | | | | | |
| 2 | - | 3 | 2 | ~ 2 | 1,5 | ~ 1 | 0,5 | - | - |
| 7 | СН | 4 | 3 | ~ 2 | 1,0 | 0,5 | - | - | - |
| 12 | «УКД-1» | 4 | 3 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 | 0,5 | - |
| 5 | - | 12 | 10,5 | 9,5 | 6,5 | 3 | 1,5 | - | - |
| 10 | СН | 14 | 11,5 | 8 | 4,5 | 1 | - | - | - |
| 13 | «УКД-1» | 14 | 12,5 | 11,5 | 10 | 7 | 5 | 1,5 | - |
| 16 | «УКД-1» | 22 | 20 | 14,5 | 8,5 | 4 | 1,5 | - | - |
| 17 | «УКД-1» | 14 | 12 | 10,5 | 8,5 | 5,5 | 3 | 0,5 | - |

Влияние свойств цемента. В таблице 3 приведены экспериментальные данные, отражающие зависимость изменения подвижности бетонных смесей с исходной формуемостью (удобоукладываемостью) марок «П1», «П3» и «П5» от свойств цемента различных заводов Беларуси при хранении и приготовленной смеси до момента испытаний в неподвижном (статическом) состоянии. Температура бетонной смеси и окружающей среды соответствовала 18...22 °С. Бетонную смесь готовили с объемом замеса в 20 л, выгружали из смесителя на поддон и только непосредственно перед испытанием пробу перемешивали в течение 60 секунд.

Таблица 3

Влияние свойств цемента на формуемость бетонной смеси, хранившейся в статическом состоянии

| Марка цемента, класс бетона | Номер состава бетона по табл. 1 | Наличие, дозировка и вид примененной добавки | Изменение формуемости бетонной смеси (ОК, см) за период (в мин) от момента приготовления | | | | | |
|--|---------------------------------|--|--|------|------|-----|-----|-----|
| | | | 15 | 30 | 45 | 60 | 75 | 90 |
| БЦЗ, М500. Бетон C ²⁵ / ₃₀ | 5 | - | 14 | 11,5 | 9,5 | 6 | 3,5 | »1 |
| | 10 | 1% СН | 13...14 | 11 | 8,5 | 5 | 2 | - |
| | 15 | 1% «УКД-1» | 14 | 12 | 10,5 | 6,5 | 4 | »1 |
| БЦЗ, М400. Бетон C ¹² / ₁₅ | 3 | - | 13 | 11 | »10 | 7,5 | 5 | 2 |
| | 8 | 1% СН | 14 | 11 | 9 | 6,5 | 3 | »1 |
| | 13 | 1% «УКД-1» | 14 | 12 | 10 | 8 | 5,5 | 3 |
| Кричевцементно-шиер, М500. Бетон C ²⁵ / ₃₀ | 5 | - | 14 | 13 | 11,5 | 9,5 | 6,5 | 4,5 |
| | 10 | СН | 13...14 | 12,5 | 10,5 | 8 | 5,5 | 3,5 |
| | 15 | 1% «УКД-1» | 14 | 13 | 12 | 10 | 7 | 5 |
| Кричевцементно-шиер, М400. Бетон C ¹² / ₁₅ | 3 | - | 13 | 12 | 11,5 | 10 | 7,5 | 6 |
| | 8 | 1% СН | 14 | 12 | 11 | »1 | 6,5 | 4,5 |
| | 13 | 1% «УКД-1» | 14 | 13 | 12 | 10 | 7,5 | 6,5 |
| Красносельскстрой-материалы, М500. Бетон C ²⁵ / ₃₀ Бетон C ³² / ₄₀ | 5 | - | 14 | 12,5 | 10,5 | 7,5 | »5 | 2 |
| | 10 | 1% СН | 13...14 | 12 | 9,5 | 6 | 3 | 1 |
| | 15 | 1% «УКД-1» | 14 | 12,5 | 11 | 8 | 5 | 3 |
| Красносельскстрой-материалы, М400. Бетон C ¹² / ₁₅ | 17 | 1% «УКД-1» | 13 | 12 | 10 | 7 | 4 | 2 |
| | 3 | - | 13 | 11,5 | 10,5 | 7,5 | 6 | 3,5 |
| | 8 | 1% СН | 14 | 11 | 10 | 6,5 | 4,5 | »2 |
| | 13 | 1% «УКД-1» | 14 | 12 | 11 | 9,5 | 7 | 4 |

Результаты экспериментов подтверждают взаимосвязь жизнеспособности бетонной смеси (способности сохранять формуемость во времени) с минералогическим и вещественным составом цемента. Например, цементы марок М400 и М500 Белорусского цементного завода характеризуются суммарным содержанием клинкерных минералов: $C_3S + C_3A$, примерно равным 63 % и 68,5 % соответственно; те же марки цемента «Красносельскстройматериалы» – ≈ 56 и 60 % (в статье эти данные не приводятся). Именно эти минералы портландцементного клинкера гидратируются с наибольшими скоростями и, соответственно, наиболее быстро связывают воду затворения, что сопровождается потерей подвижности бетонной смеси.

В результате смеси на цементе с большим содержанием « $C_3S + C_3A$ » характеризуются, при прочих равных условиях, меньшей жизнеспособностью, то есть их подвижность снижается во времени с большей скоростью. Введение в бетон комплексной добавки «УКД–1» (в условиях данного эксперимента) практически не оказало влияния на изменения во времени формовочных свойств бетонных смесей тяжелого конструктивного бетона в сравнении со смесями без добавок на всех разновидностях использованного цемента и классах бетона. Эти данные в целом коррелируются с влиянием «УКД–1» на сроки схватывания этих цементов [11], так как основываются на развитии общего для обоих случаев процесса взаимодействия вяжущего с водой затворения. Комплексная добавка «УКД–1» содержит замедляющий схватывание цемента (потери подвижности бетонной смеси) компонент в виде «СП» и ускоряющие эти процессы – сульфат натрия и УНМ. Их соотношение в добавке «УКД–1» практически «уравновешивает» воздействие на гидролизно-гидратационный процесс в начальный период времени, что и подтверждают результаты данного эксперимента. Следует учесть, что составы бетона с добавкой «УКД–1» характеризовались меньшими величинами $(V/C)_6$, чем составы без этой добавки при исходной равноподвижности смеси.

Приведенные для сравнения данные по бетонным смесям с ускорителем твердения Na_2SO_4 (дозировка также 1% от МЦ) показывают, что на всех примененных разновидностях цемента потери подвижности смеси нарастают. При этом значительно прогрессирует процесс ухудшения формуемости смеси на цементе БЦЗ, в сравнении с вяжущими других заводов, содержащими меньшее количество « $C_3S + C_3A$ » и, соответственно, менее активными.

Следует отметить, что эта тенденция усиливается с повышением начального расхода цемента (повышением класса бетона), так как при

этом снижается водоцементное отношение бетона и относительное водосодержание цементного теста в нем.

Влияние механического воздействия. В таблице 4 приведены результаты экспериментов, показывающие изменения подвижности низкопластичной бетонной смеси (составы №№ 2, 7 и 12) и пластичной (№№ 3, 8, 13) на примере бетона класса $C^{12}/_{15}$. Бетонную смесь перемешивали (в лабораторном бетоносмесителе принудительного принципа действия) в течение 2 (только на стадии приготовления бетона), 15 и 30 минут, имитируя вариант ее транспортирования с постоянным (или периодическим, но в целом 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 реального транспортирования автобетоносмесителем. Температура бетонной смеси и окружающей среды в этих экспериментах соответствовала 18...22°С.

Как следует из полученных данных, продолжительное перемешивание бетонной смеси обеспечивает поддержание ее формовочных свойств во времени. В сравнении с традиционным временем перемешивания смеси на стадии приготовления (в экспериментах – 120 секунд) увеличение его до 15 минут способствует незначительному росту подвижности (осадки конуса), определенной сразу после выгрузки смеси из бетоносмесителя. Очевидно, это связано с более равномерным распределением жидкости и цементного теста в объеме смеси, то есть с повышением ее гомогенности (однородности).

Увеличение времени перемешивания до 30 минут 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. В частности, с увеличением времени перемешивания бетонной смеси нарастает эффект увеличения площади поверхности твердой фазы, способной адсорбировать воду. Во-первых, это происходит 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 крупного и мелкого заполнителей, являющихся своеобразными мелющими телами, силы трения (постоянно нарушая (срывая) «пленки» воды и продуктов гидратации с поверхности частиц цемента) активизируют поверхностные силы частиц вяжущего, что способствует ускорению процессов гидролиза-гидратации цемента.

Таблица 4

Влияние продолжительного перемешивания на сохранение формовочных свойств бетонных смесей

| Номер состава бетона по таблице 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 |
| 2 7 12 | - | 2 | 4 | 3 | 2,5 | 2 | » 2 |
| | СН | 2 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1,5 |
| | «УКД-1» | 2 | 5 | 4 | 3,5 | 3 | 2,5 |
| 3 8 13 | - | 2 | 15 | 1 | 12 | 11 | 9,5 |
| | СН | 2 | 15 | 13 | 12 | 10 | 8 |
| | «УКД-1» | 2 | 16 | 14 | 13 | 12 | 10,5 |
| 2 7 12 | - | 15 | 5 | 3 | 1,5 | 0,5 | - |
| | СН | 15 | 5 | 2 | 1 | - | - |
| | «УКД-1» | 15 | 6 | 3,5 | 2,5 | 0,5 | - |
| 3 8 12 | - | 15 | 16 | 12 | 9,5 | 6 | 3,5 |
| | СН | 15 | 16 | 11 | 7 | 3 | 0,5 |
| | «УКД-1» | 15 | 17 | 13 | 10 | » 7 | 3 |
| 2 7 12 | - | 30 | 3,5 | » 2 | » 1 | 0,5 | - |
| | СН | 30 | 4 | 1 | » 0,5 | - | - |
| | «УКД-1» | 30 | 4,5 | 2,5 | » 2 | 0,5 | - |
| 3 8 12 | - | 30 | 14 | 11,5 | 6 | 3 | 0,5 |
| | СН | 30 | 14 | 11 | 5 | 1 | - |
| | «УКД-1» | 30 | 15 | 11,5 | » 6 | 2,5 | - |

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 продолжительности перемешивания. Так, смесь без добавок (составы №2 и №3) сохраняет подвижность в пределах марки П1 (4...1 см) при 2 минутах перемешивания до 90 минут (см. таблицу 4,7), при 15 минутах – до 30...45 минут и при 30 минутах перемешивания – до 30 минут; для марки П3 (15...10 см) это время соответствует 60, 30 и 15...20 минут. Введение в смесь с продолжительным перемешиванием добавки СН закономерно ускоряет процесс потери подвижности ей в пределах марки П1 до 15...30 минут от момента приготовления, а для марки П3 – до 15...20 минут.

Исследуемая комплексная добавка «УКД–1» обеспечивает некоторый рост подвижности пластичной смеси сразу после выгрузки при продолжительном перемешивании (очевидно, из-за более равномерного распределения в объеме цементного теста и бетона пластифицирующего компонента 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 30 минут от времени выгрузки смеси. Вместе с тем, можно сделать вывод, что при продолжительном перемешивании (побуждении в пути следования) смеси с добавкой «УКД–1» имеет место достаточный по продолжительности (до 30 минут) период для работы с ней на объекте (для подачи и укладки бетона в опалубку).

Водоотделение и раствороотделение. Подача бетонных смесей в опалубку современными способами (особенно бетононасосами и пневмонагнетанием) и качество (однородность) укладки бетона зависят от подверженности пластичных смесей расслоению. В свою очередь гомогенность (однородность) бетонной смеси, содержащей крупный заполнитель, зависит от ряда факторов: свойств цемента, начального водосодержания, соотношения и свойств заполнителей и других, среди которых существенным является влияние введенных в состав бетона химических добавок. В этой связи было необходимо исследовать влияние добавки «УКД–1» на характеризующие однородность бетонной смеси показатели – водоотделение и раствороотделение, которые экспериментально определены в сопоставлении с равноподвижными смесями марок «П1» и «П3» без добавок.

Водоотделение бетонных смесей – это проявление передозировки воды над необходимым ее количеством, которое может быть удержано частицами твердой фазы в бетоне за счет потенциала ее поверхности.

Наибольшей «водоудерживающей» способностью в бетоне обладает цемент, так как именно вяжущее из-за своей дисперсности характеризуется наибольшим значением потенциала поверхности. Чистые заполнители плотных горных пород (кварц и полевоый шпат, являющиеся основой песка; гранитообразующие породы щебня) обладают меньшим потенциалом поверхности, который возрастает с увеличением в заполнителях доли мелких фракций за счет повышения их удельной поверхности.

Таким образом, физическая основа проявления эффекта водоотделения (результаты приведены в таблице 5) – это наличие в бетоне жидкости в количестве, которое превышает некоторый предел суммарных сил поверхности твердой фазы, входящей в его состав.

Таблица 5

Водоотделение пластичных бетонных смесей

| Номер состава бетона по таблице 1, наличие добавок, осадка конуса, см | Масса сосуда со смесью, г | Масса отделившейся воды, г | Показатель водоотделения по СТБ 1545-2005, % | Снижение показателя, % |
|--|----------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| №2; без добавок; ОК ~ 4 см | 2450 | 13,6 | 1,51 | - |
| №12; 1% «УКД-1»; ОК ~ 4 см | 2477 | 10,1 | 1,12 | 27,4 |
| №5; без добавок; ОК ~ 13 см | 2414 | 18,7 | 2,08 | - |
| №15; 1% «УКД-1»; ОК ~ 14 см | 2462 | 11,4 | 1,27 | 38,9 |

В результате проявления сил гравитационного притяжения (седиментации), а также эффекта контракции (стяжения, уменьшения объема или гидратации цемента) цементного теста из объема бетона мигрирует «свободная» (не связанная) вода и накапливается на поверхности конструкции (изделия) или образцов.

Методика экспериментов (при объеме мерного сосуда – 1 л) соответствовала изложенной в п.8.4 СТБ 1545-2005 [14], поэтому не приводится. Во всех случаях объем бетонной смеси, укладываемой на 1,5 часа в мерный сосуд (отбор собирающейся воды – через каждые 15 минут) был равен 900 см³ (0,9 л). Составы бетона для сравнительных испытаний приняты по таблице 1, в частности, равноподвижные для марки «П1» – №2 (класс С12/15, содержание цемента 275 кг, В/Ц ~ 0,58) и №12 (С12/15; Ц = 275 кг; В/Ц ~ 0,52; 1% «УКД-1»); для марки «П3» – №5 (С25/30; Ц = 465 кг; В/Ц ~ 0,45) и №15 (С25/30; Ц = 345 кг; В/Ц ~ 0,42; 1% «УКД-1»). Из результатов экспериментов, представленных в табли-

це 5, следует, что равноподвижные бетонные смеси с добавкой «УКД–1» характеризуются меньшим (на ~ 25% для марки «П1» и ~ (35...40)% для марки «П3») водоотделением по сравнению со смесями без добавок.

Следует отметить, что абсолютные величины полученных данных по водоотделению смесей не имеют принципиального значения, но сравнение их показывает эффективность использования добавки «УКД–1» с позиций повышения качества бетона. Причины снижения водоотделения смесей с добавкой очевидно связаны и обуславливаются двумя основными факторами: во-первых, уменьшением расхода цемента (то есть объема цементного теста, из которого «уходит» отделяемая под действием сил тяжести и эффекта контракции вода); во-вторых, за счет снижения начального водосодержания бетона от эффекта пластификации добавки «УКД–1». В совокупности эти факторы обусловили снижение на (25...40)% водоотделения бетонных смесей в рамках выполненных экспериментов.

Раствороотделение бетонной смеси характеризует ее расслаиваемость при динамическом воздействии, возникающем при транспортировании и уплотнении бетона. Сущность определения этой характеристики заключается в проявлении расслоения смеси под воздействием динамических импульсов, в результате которого появляются различия состава исходного бетона в верхней и нижней частях образца в процессе вибрирования на лабораторной виброплощадке со стандартными параметрами (амплитуда: $A \sim 0,5 \pm 0,05$, мм; частота: $f \sim 2900 \pm 100$, кол/мин).

Эти различия состава оцениваются по содержанию растворной составляющей бетона в верхней и нижней частях мерного сосуда (объем 5 л) после вибрирования пластичных смесей марок «П1» и «П2» в течение 25 секунд, марки «П3» – 10 секунд, марок «П4» и «П5» – в течение (7...3) секунд. Показатель раствоороотделения бетонной смеси определяют как соотношение разницы масс растворной составляющей бетона в верхней (0,5h) и нижней (0,5h) части испытуемого слоя высотой «h», отнесенной к их общей массе и выраженной в процентах.

Эксперименты по определению раствоороотделения бетонных смесей и зависимости этого явления от наличия в составе добавки «УКД–1» по методике СТБ 1545-2005 [14] проведены на составах бетона подвижностью марок «П1» и «П3», классов $C^{12}/_{15}$ (№2 и №12) и $C^{25}/_{30}$ (№5 и №15) по таблице 1, а их результаты приведены в таблице 6.

Анализ данных по раствоороотделению смесей с добавкой «УКД–1» (№12 и №15) и без добавок (№2 и №5) отражает ту же тенденцию, что и ранее полученные экспериментальные данные по водоотделению бетонных смесей указанных составов (таблица 5).

Раствороотделение бетонных смесей

| Номер состава бетона по таблице 1, наличие добавки, осадка конуса, см | Масса бетонной смеси, г | | Масса щебня, г | | Масса раствора, г | | Показатель раство­роотделения, Пр, % | Сниже­ние по­казателя, % |
|---|-------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------|
| | в верх­ней части | в ниж­ней части | в верх­ней части | в ниж­ней части | в верх­ней части | в ниж­ней части | | |
| №2; без добавок; ОК ~ 4 см | 6108 | 5892 | 2973 | 3027 | 3135 | 2865 | 4,5 | - |
| №12; 1% «УКД-1»; ОК ~ 4 см | 5970 | 6105 | 2950 | 3301 | 3020 | 2804 | 3,7 | ~ 18 |
| №5; без добавок; ОК ~ 13 см | 5985 | 5765 | 2678 | 2972 | 3307 | 2993 | 5,0 | - |
| №15; 1% «УКД-1»; ОК ~ 14 см | 6055 | 5985 | 2886 | 3054 | 3169 | 2931 | 3,9 | 22 |

То есть, и при статическом хранении бетонных смесей с добавкой «УКД-1» (водоотделение), и при динамическом воздействии вибрацией (раствороотделение) более устойчивыми к расслоению являются смеси с добавкой. Общая тенденция в обоих вариантах испытаний подчеркивает общность причин, обеспечивающих более высокую степень однородности равноподвижных бетонных смесей: с добавкой «УКД-1» равная подвижность (и одинаковая прочность бетона) обеспечиваются при уменьшенном объеме цементного теста (расходе цемента) и снижении начального водосодержания. При этом, в рамках выполненных экспериментов, снижение показателя раство­роотделения для равноподвижных бетонных смесей с добавкой 1% «УКД-1» составило ~ 18% для подвижности марки «П1» и 22% – для марки «П3».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Влияние добавки «УКД-1» на изменение формовочных свойств бетонных смесей предсказуемо, подчиняется характерным для входящих в ее состав пластифицирующего и ускоряющих твердение бетона компонентов и требует от пользователя обычных (стандартизированных) мероприятий перед ее применением в производимых бетонах.

2. Время сохранения формовочных свойств смесей тяжелого бетона с добавкой «УКД-1» зависит от температуры смеси и наружного воздуха, от свойств цемента и исходной консистенции и в диапазоне температур 0...5°С до 25...30 °С (в пределах выполненных экспериментов) может составить от 120 минут до 30 минут при исходной подвижности бетонной смеси марок «П1» и «П5», что обеспечивает возможность ее применения в монолитном бетоне, с учетом оценки строительной лабораторией «поведения» смесей для конкретных условий ведения бетонных работ.
3. Влияние минералогического состава цемента (в основном – количества «С₃S + С₃А»), его вещественного состава (наличие или отсутствие минеральных добавок) на сохраняемость формовочных свойств бетонных смесей с добавкой «УДК-1» проявляется в общеизвестных закономерностях, связанных с содержанием в вяжущем этих наиболее активно гидратирующихся клинкерных минералов и влиянием на этот процесс вещества введенных минеральных добавок. Специфического действия добавки «УКД-1» в зависимости от этих факторов не выявлено.
4. Установленное экспериментально повышение устойчивости бетонных смесей с добавкой «УКД-1» к расслоению (водо-, раствооротделению) связано со снижением водосодержания равноподвижных смесей и снижения расхода цемента (объема цементного теста) для равнопрочных бетонов за счет эффективности данной добавки, проявляющейся в росте плотности и прочности цементного камня и бетона.
5. Результаты экспериментов позволили обосновать временные режимы транспортирования бетонных смесей с добавкой «УКД-1» для круглогодичного ведения бетонных работ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Zhdanok, S. A. // Fifth ISTC Scientific Advisory Committee Seminar «Nanotechnologies in the area of physics, chemistry and biotechnology». – St Petersburg, 27–29 May, 2002.
2. Жданок, С. А., Крауклис, А. В., Самцов, П. П., Волжанкин, В. М. Установка для получения углеродных наноматериалов. Патент №2839.
3. Жданок, С. А., [и др.] Плазмохимический реактор конверсии углеводородов в электрическом разряде. Патент №3125.
4. Жданок, С. А., Хрусталева, Б. М., Батяновский, Э. И., Леонович, С. Н. Нанотехнологии в строительном материаловедении:

- реальность и перспективы // Вестник БНТУ. – № 3, 2009. – С. 5–22.
5. Батяновский, Э. И., Рябчиков, П. В., Якимович, В. Д. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента. XVI Межд. науч.-метод. Семинар/ Под общ. Ред. П. С. Пойты, В. В. Тура. – Бр.: БрГТУ, 2009. – ч. 2. – С. 136.
 6. Батяновский, Э. И., Крауклис, А. В., Самцов, Петр П., Рябчиков, П. В., Самцов, Павел П. Влияние углеродных наноматериалов на свойства цемента и цементного камня. // Строительная наука и техника. – №1-2(28-29), 2010. – С. 3–10.
 7. Батяновский, Э. И., Якимович, В. Д., Рябчиков, П. В. Особенности технологии высокопрочного бетона на отечественных материалах, включая наночуглеродные добавки. // Сборник материалов III международного симпозиума «Проблемы современного бетона и железобетона». – Мн.: РУП «Ин-т БелНИИС», 2011. – С. 53–68. (Т. 2).
 8. Батяновский, Э. И., Галузо, Г. С., Мордич, М. М. Особенности применения углеродных наноматериалов в конструкционно-теплоизоляционных пенобетонах. Сборник материалов Девятой международной научно-технической конференции «Наука – образованию, производству, экономике». – Мн.: БНТУ, 2011. – С. 272–273.
 9. Пособие П1-99 к СНиП 3.09.01-85. Применение добавок в бетон. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2000. – 33 с.
 10. Батяновский, Э. И., Иванова, Е. И., Осос, Р. Ф. Эффективность и проблемы энергосберегающих технологий цементного бетона // Строительная наука и техника. – № 3(6), 2006. – С. 7–17.
 11. Шейда, О. Ю., Батяновский, Э. И. Влияние комплексной химической добавки, содержащей структурированный углеродный наноматериал, на свойства цемента. – Мн.: БНТУ, 2014. – С. 272–273.
 12. СТБ 1035-96 Смеси бетонные. Технические условия. – Мн.: Стройтехнорм, 1997. – 12 с.
 13. ТКП 45-5.03-21-2006 (02250). Бетонные работы при отрицательных температурах воздуха. Правила производства. – Мн.: Стройтехнорм, 2006. – 107 с.
 14. СТБ 1545-2005. Смеси бетонные. Методы испытания. – Мн.: Минстройархитектуры РБ, 2005. – 20 с.

Статья поступила в редколлегию 25.09.2014