

Гуриненко Наталья Сергеевна, канд. техн. наук, старший преподаватель, Белорусский национальный технический университет, г. Минск (Беларусь)

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

ОПТИМИЗАЦИЯ СОСТАВА КОМПЛЕКСНОЙ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ ПО КРИТЕРИЮ ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ И БЕТОНА

© РУП «Институт БелНИИС», 2020
Institute BelNIIS RUE, 2020

АННОТАЦИЯ

В материале статьи приведены результаты исследований влияния новой комплексной полифункциональной добавки, содержащей пластификатор, ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) и ускоряюще-уплотняющий компонент, на кинетику твердения (температура) и уровень прочности на сжатие тяжелого конструкционного бетона.

С применением методов математической статистики оценено влияние на процесс твердения (рост прочности) цементного камня и цементного бетона, составляющих полифункциональную добавку компонентов (при разном их соотношении в комплексе в целом).

На этом основании (включая результаты экспериментальной оценки прочности образцов цементного камня и бетона) разработаны и запатентованы составы полифункциональной добавки в бетон, характеризующиеся оптимальным диапазоном содержания в ее составе компонентов: суперпластификатора на основе поликарбоксилатных смол – 0,25 %...0,5 % от

массы цемента, ультрадисперсного микрокремнезема (SiO_2) – 0,25 %...1,0 % от МЦ, ускорителя твердения – сульфата натрия (Na_2SO_4) – 0,35 %...0,5 % от МЦ и уплотняющей структуру добавки – сульфата алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – 0,15 %...0,25 % от МЦ, при меньших значениях для тяжелого конструкционного бетона класса $\leq \text{C}50/60$ и больших значениях для высокопрочного, особо плотного бетона класса $\geq \text{C}70/85$ (прочностью $f_{\text{см.28}} \geq 100$ МПа).

В исследованиях прочностных характеристик и эксплуатационных свойств бетона применены стандартизованные методики испытаний.

Результаты экспериментальных исследований подтверждены производственными испытаниями разработки, их данные заактивированы и подтверждают возможность экономии цемента на 10 %...15 % без снижения прочностных и эксплуатационных свойств бетона, при снижении затрат тепловой энергии на обогрев изделий из бетона с добавкой в 1,5...2,0 раза (за счет сокращения времени подачи теплоносителя до 1,5...2,0 ч (с последующим твердением по методу термоса) и снижения температуры разогрева бетона до 45 °С...50 °С).

Ключевые слова: цемент, бетон, добавка, ультрадисперсный микрокремнезем, микрокремнезем, твердение, цементный камень, прочность, свойства.

Для цитирования: Гуриненко, Н. С. Оптимизация состава комплексной полифункциональной добавки по критерию прочности цементного камня и бетона / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2020. – Вып. 12. – С. 102-119. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-07>.

Natalia Gurinenko, PhD in Engineering Science, Senior Lecturer, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

Eduard Batyanovskiy, DSc in Engineering Science, Professor, Head of the Department, Belarusian National Technical University, Minsk (Belarus)

OPTIMIZATION OF THE COMPOSITION OF A COMPLEX POLYFUNCTIONAL ADDITIVE BY THE STRENGTH CRITERION OF CEMENT STONE AND CONCRETE

ABSTRACT

The article presents the results of studies of the effect of a new complex multifunctional additive containing a plasticizer, ultradispersed microsilica (UDMS) and an accelerating-sealing component on the hardening kinetics (growth rate) and the level of compressive strength of heavy structural concrete.

Using the methods of mathematical statistics, the influence on the hardening process (growth of strength) of cement stone and cement concrete of the components constituting a multifunctional additive (with their different ratios in the complex as a whole) was evaluated.

On this basis (including the results of an experimental assessment of the strength of cement stone and concrete samples), compositions of a polyfunctional additive to concrete have been developed and patented, characterized by the optimal range of content in its composition of components: superplasticizer based on polycarboxylate resins – 0.25 %...0.5 % of the mass of cement, ultradispersed microsilica (SiO_2) – 0.25 %...1.0 % of WC, hardening accelerator – sodium sulfate (Na_2SO_4) – 0.35 %...0.5 % from WC and the additives that seal the structure – aluminum sulfate ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – 0.15 %...0.25 % of WC, at lower values for heavy structural concrete of class $\leq \text{C50/60}$ and higher values for high-strength, especially dense concrete of class $\geq \text{C70/85}$ (strength $f_{\text{cm},28} \geq 100$ MPa).

In studies of the strength characteristics and operational properties of concrete, standardized test methods were used.

The results of experimental studies are confirmed by production tests of the development, their data are recorded and confirm the possibility of saving cement by 10 %...15 % without reducing the strength and operational properties of concrete, while reducing the cost of heat energy for heating concrete products with an additive of 1.5...2.0 times (by reducing the time of supplying the coolant to 1.5...2.0 h (with subsequent hardening by the thermos method) and reducing the temperature of concrete heating to 45 °C...50 °C).

Keywords: cement, concrete, additive, micro silica ultradispersible, micro silica, hardening, cement stone, strength, properties.

For citation: Gurinenko N., Batyanovskiy E. *Optimizatsiya sostava kompleksnoy polifunktsionalnoy dobavki po kriteriyu prochnosti tsementnogo kamnya i betona* [Optimization of the composition of a complex polyfunctional additive by the strength criterion of cement stone and concrete]. In: *Contemporary Issues of Concrete and Reinforced Concrete: Collected Research Papers*. Minsk. Institute BelNIIS. Vol. 12. 2020. pp. 102-119. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2020-12-07> (in Russian).

ВВЕДЕНИЕ

Повышение качественных характеристик конструкционного бетона, снижение энергетических затрат на ускорение его твердения как в производстве сборных изделий, так и в монолитном строительстве обеспечивает применение комплексных многофункциональных добавок, содержащих в своем составе химически активные компоненты и активные минеральные вещества [1–3]. В развитие этого направления в технологии цементного бетона авторами предложено, экспериментально и путем производственной апробации эффективности обосновано получение новой полифункциональной добавки в бетон [4], позволяющей (за счет комплексного действия) на 10 %...15 % снизить расход цемента и в 1,5...2,0 раза (за счет сокращения подачи теплоносителя до 1,5...2,0 ч и разогрева бетона до температуры 45 °C... 50 °C) уменьшить расход тепловой энергии на ускорение его твердения.

Этот результат обеспечивается рациональным сочетанием разных эффектов воздействия от компонентов добавки на реагирующую систему «цемент–вода» в цементном бетоне, взаимно дополняющих друг друга. Рассматриваемая в материале настоящей статьи добавка преемственна по отношению к ранее апробированной добавке ускоряюще-уплотняющего структуру бетона действия [5] и являющейся ее компонентом.

Основной проблемой разработки многокомпонентной добавки является подбор оптимального соотношения составляющих ее компонентов. С этой целью были установлены математические зависимости между прочностью цементного камня и бетона и количеством вводимых в разных соотношениях компонентов разрабатываемой добавки. Полученные математические модели послужили основой для подбора ее оптимального состава.

В статье приведены данные по оценке влияния на кинетику твердения (рост прочности) цементного камня и бетона компонентов разрабатываемой комплексной полифункциональной добавки, имеющей в своем составе пластификатор, ускоритель твердения, уплотняющий структуру бетона компонент и минеральный компонент в виде ультрадисперсного микрокремнезема (УДМК), вводимого взамен традиционного микрокремнезема. Результатами математико-статистической обработки экспериментальных данных в виде полученных уравнений регрессии путем оценки изменений прочности цементного камня и бетона обосновано рациональное сочетание компонентов комплексной полифункциональной добавки, характеризующееся наибольшей эффективностью.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

В исследованиях использовали материалы со следующими характеристиками.

В качестве вяжущего вещества – портландцемент марки ПЦ 500 по ГОСТ 10178, соответствующий классу СЕМ I 42,5 N по СТБЕН 197-1 (примерный минералогический состав: $C_3S \sim 58,4\%$, $C_3A \sim 5,57\%$, $C_2S \sim 18,9\%$, $C_4AF \sim 13,3\%$); $K_{нг} = 0,25$, со сроками схватывания: начало – 2ч 10 мин, конец – 3 ч 50 мин.

Крупный заполнитель для бетона – щебень гранитный (Микашевичи) фракций 5...10 мм и 5...20 мм, прочностью (по дробимости) ≥ 110 МПа, насыпной плотностью $\rho^0 \sim 1380$ кг/м³ и 2410 кг/м³, плотностью зерен $\rho_{30} \sim 2700$ кг/м³, соответствующий требованиям ГОСТ 8267-93.

Крупный заполнитель для бетона – щебень кубовидный фракций 2...4 мм, 4...6 мм, прочностью (по дробимости) ≥ 110 МПа, насыпной плотностью $\rho^0 \sim 1400...1420$ кг/м³, плотностью зерен $\rho_3^0 \sim 2700$ кг/м³, соответствующий требованиям СТБ 1311-2002.

Мелкий заполнитель – природный (мытый) песок, с модулем крупности $M_k \sim 2,6...2,8$, насыпной плотностью $\rho^0 = 1550$ кг/м³; плотностью зерен $\rho_3^0 \sim 2650$ кг/м³, соответствующим требованиям ГОСТ 8736-93.

Вода для затворения и последующего твердения бетона, удовлетворяющая требованиям СТБ 1114-98.

Сульфат натрия (Na_2SO_4 ; СН) кристаллизационный, по ГОСТ 21458-75 – белое, порошкообразное, кристаллическое вещество, без запаха.

Сульфат алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$; СА) по ГОСТ 12966-85 – твердое, белое, кристаллическое вещество, без запаха.

Добавка-гиперпластификатор Стахемент 2000-М Ж 30 (Ст) – пластифицирующая добавка для бетонных смесей и растворов. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы согласно СТБ 1112-98. Сертификат соответствия требованиям СТБ 1112-98 «Добавки для бетонов» № ВУ /112 03.1.3 ГА 1764. Добавка выпускается по ТУ ВУ 800013176.004-2011 в виде раствора 30 %-й концентрации.

Микрокремнезем (МК) – в соответствии с требованиями СТБ EN 197-1-2015 с содержанием аморфного диоксида кремния не менее 85 % по массе; потери при прокаливании – не более 4,0 %; удельная поверхность (по методу БЭТ) $\geq 15,0$ м²/г (при использовании приборов типа ПСХ СудМК $\geq 3,0$ м²/г или 30 000 см²/г).

Ультрадисперсный микрокремнезем (УДМК) – диоксид кремния осажденный, соответствующий ТУ 2168-002-14344269-2009 «Ковелос 35/05т» с характеристиками, приведенными в таблице 1.

Характеристики УДМК

Наименование показателя	Фактически
Внешний вид и цвет	Белый рыхлый порошок
Запах	Не выражен
Массовая доля диоксида кремния (в сухом остатке), %	98,0
Массовая доля воды, %	6,0
Массовая доля растворимого Fe, %	0,1
Массовая доля сульфатов, %	1,8
Площадь удельной поверхности, м ² /г	350,0
pH (5 %-я водная суспензия)	6,1
Насыпная плотность при 20 °С, г/л	55,0

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА КИНЕТИКУ РОСТА ПРОЧНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ

В статье частично представлены данные (рисунок 1) по экспериментальному обоснованию рационального соотношения компонентов в полифункциональной комплексной добавке, включающей пластификатор, ультрадисперсный микрокремнезем и ускоряюще-уплотняющую составляющую СН + СА. Исследования в совокупности выполнены с изменением содержания в добавке компонентов (от массы цемента) в диапазоне: пластификатора – 0,25 %...0,5 %, СН – 0,35 %...0,5 %, СА – 0,15 %...0,25 %, УДМК – 0,25 %...1,0 %.

Одновременно в сравнительном варианте оценивали эффективность (по критерию роста прочности цементного камня) традиционного микрокремнезема и УДМК.

На рисунке 1 отражены результаты (среднее значение в сериях из 6...12 образцов) исследований влияния составляющих такой добавки и комплекса в целом на кинетику твердения и уровень прочности цементного камня.

Комплексную полифункциональную добавку готовили в виде водного раствора в воде затворения требуемого количества сульфата натрия, сульфата алюминия и пластификатора, вводя в него в расчетном количестве ультрадисперсный микрокремнезем.

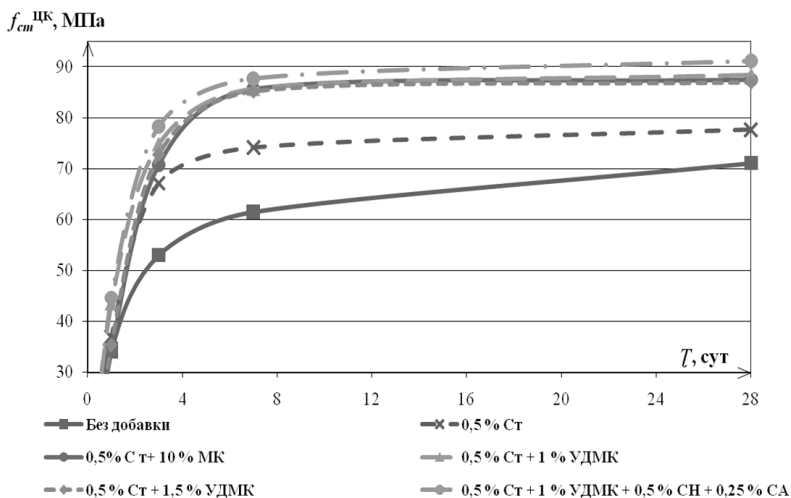


Рисунок 1. Тенденция роста прочности образцов цементного камня при твердении в нормально-влажностных условиях

Во всех случаях практически одинаковой была консистенция цементного теста, из которого изготавливали образцы (20 × 20 × 20 мм, не менее 6 штук в серии).

Из результатов экспериментов, представленных на рисунке 1, очевиден эффект от комплексной полифункциональной добавки – 0,5 % Ст + + 1 % УДМК + 0,5 % СН + 0,25 % СА – как в сравнении по темпу роста, так и по уровню прочности цементного камня. При этом прочность существенно возрастает не только относительно образцов без добавки (на ~ 86,5 % через 24 ч и ~ 27,0 % к 28 сут твердения), но и относительно образцов с дозировкой 0,5 % пластификатора (на ~ 20,5 % через 24 ч и ~ 17,6 % к 28 сут твердения), несмотря на практическое равенство водоцементного отношения в последнем случае.

Кроме изложенного, очевиден равнозначный эффект по влиянию на прочность цементного камня введения в состав цементного теста 10 % от массы цемента традиционного микрокремнезема и 1 % УДМК, что, как подтверждено далее, обеспечивает возможность такой замены в конструкционном бетоне без ущерба для его прочности.

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Для выявления роли компонентов и подтверждения достоверности полученных результатов по оценке прочности цементного камня с разрабатываемой комплексной ускоряюще-уплотняющей добавкой выполнили их статистическую обработку по методике источников [6, 7].

При проведении экспериментов в зависимости от условий задачи все факторы варьировались на трех уровнях: среднем (или основном), нижнем и верхнем, отстоящих от основного на одинаковую величину, называемую интервалом варьирования.

Для упрощения записей и последующих расчетов верхний уровень обозначили символом +1, средний 0, а нижний – –1, что равносильно переводу факторов в новый кодированный (нормализованный) масштаб:

$$x_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (1)$$

где x_i – значение i -го фактора в новом кодовом масштабе;

X_i – значение i -го фактора в натуральном масштабе;

X_{i0} – основной уровень i -го фактора;

ΔX_i – интервал варьирования i -го фактора.

В данном случае использовали нелинейный пятифакторный план второго порядка.

Исследовали влияние компонентов полифункциональной добавки (сульфата натрия, сульфата алюминия и ультрадисперсного микрокремнезема) на прочность образцов цементного камня, твердевших в нормально-влажностных условиях. Так как для обеспечения требуемой консистенции смеси применяли пластификатор, то его роль учли через два фактора – водоцементное отношение (В/Ц), а также возраст образцов (время твердения, сут). Далее выбрали интервалы варьирования факторов (таблица 2).

После статистической обработки данных (в статье не приводятся) получили уравнение регрессии для оценки прочности цементного камня с полифункциональной добавкой:

Интервалы варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение фактора				
		x1	x2	x3	x4	x5
Основной уровень	0	0,6	0,3	1	0,23	15
Интервал варьирования	Dxi	0,6	0,3	1	0,03	14
Верхний уровень	+	1,2	0,6	2	0,26	29
Нижний уровень	-	0	0	0	0,2	1

Факторы:

- x_1 – количество добавки СН в % от массы цемента;
- x_2 – количество добавки СА в % от массы цемента;
- x_3 – количество добавки УДМК в % от массы цемента;
- x_4 – водоцементное отношение цементного теста (В/Ц);
- x_5 – время твердения образцов, сут.

$$y = 84,02 + 3,22 x_1 + 2,23 x_2 + 3,58 x_3 + 0,53 x_4 + 22,36 x_5 - 2,23 x_1 x_1 - 3,23 x_2 x_2 - 3,73 x_3 x_3 + 2,77 x_4 x_4 - 14,23 x_5 x_5 + 1,3 2 x_1 x_2 - 1,09 x_1 x_4 - 2,01 x_1 x_5 - 0,72 x_2 x_3 + 0,53 x_2 x_4 - 0,63 x_2 x_5 + 1,12 x_3 x_4 + 1,78 x_3 x_5 - 1,22 x_4 x_5, \text{ МПа.} \quad (2)$$

Далее по полученному уравнению рассчитали значения прочности цементного камня, при этом периодически изменяли по два фактора, а три фактора принимали фиксированными, отклик представили в виде графиков (рисунки 2–5).

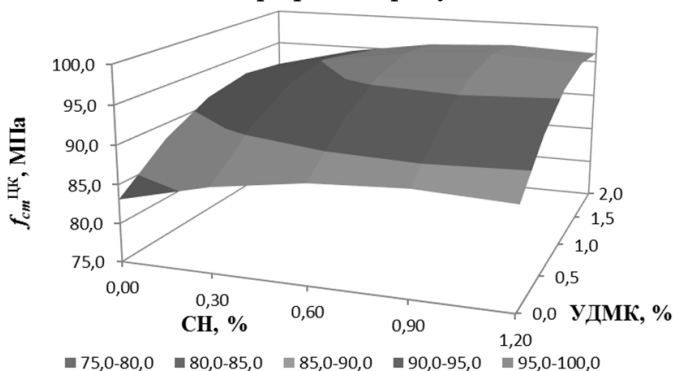


Рисунок 2. Влияние факторов x_1 (содержание СН) и x_3 (содержание УДМК) на параметр y (прочность цементного камня) при СА = 0,3 % от МЦ, В/Ц = 0,2 в возрасте 29 суток

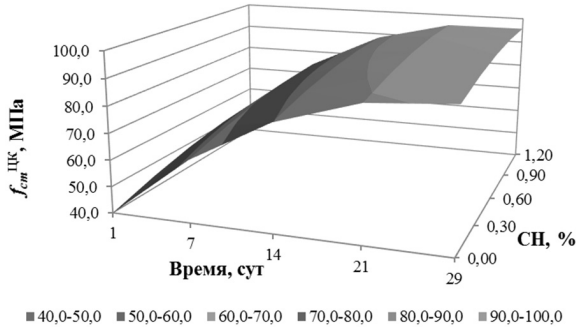


Рисунок 3. Влияние факторов x_1 (содержание СН) и x_5 (время твердения) на параметр y (прочность цементного камня) при УДМК = 1 % от МЦ, СА = 0,3 % от МЦ и В/Ц = 0,2

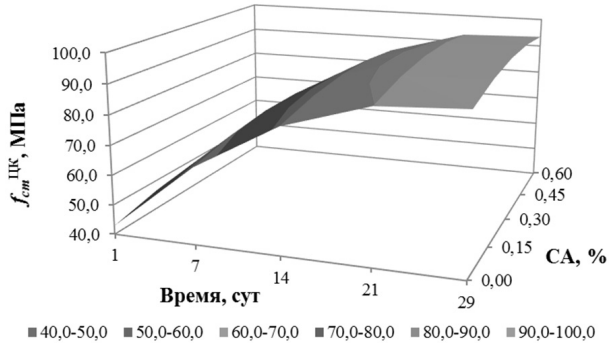


Рисунок 4. Влияние факторов x_2 (содержание СА) и x_5 (время твердения) на параметр y (прочность цементного камня) при УДМК = 1 % от МЦ,

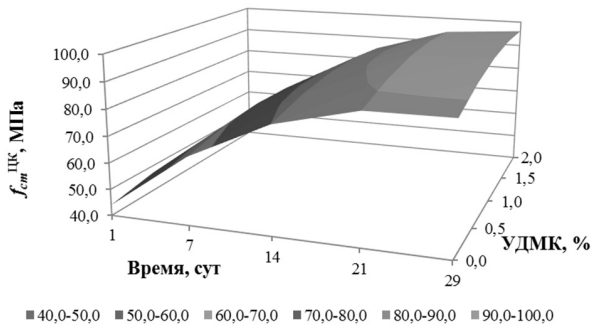


Рисунок 5. Влияние факторов x_3 (содержание УДМК) и x_5 (время твердения) на параметр y (прочность цементного камня) при СН = 0,6 % от МЦ, СА = 0,3 % от МЦ и В/Ц = 0,2

Расчетные данные, полученные по уравнению регрессии (2), отличаются от экспериментальных не более чем на 5 %, что свидетельствует о возможности его использования для практических расчетов.

Обработка экспериментальных данных посредством стандартизированного расчета коэффициента вариации прочности цементного камня (ГОСТ 18105-2010) показала, что он находится в пределах 10 %...16 %. Это свидетельствует о достаточной степени достоверности полученных результатов.

ВЛИЯНИЕ КОМПОНЕНТОВ ПОЛИФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ДОБАВКИ НА КИНЕТИКУ РОСТА ПРОЧНОСТИ БЕТОНА

С целью оценки влияния отдельных компонентов комплексной полифункциональной добавки и комплекса в целом на кинетику роста и уровень прочности конструкционного бетона исследования осуществляли на образцах-призмах (40 x 40 x 160 мм). Здесь представлены данные, относящиеся к конструкционному мелкозернистому бетону.

Образцы изготавливали вибрированием из цементно-песчаной смеси (примерно одинаковой консистенции, т. е. равноподвижной смеси по расплыву конуса (~ 110...120 мм)) состава: Ц : П = 1 : 3, при водоцементном отношении $(В/Ц)_6 = 0,5$ во всех случаях, кроме составов с пластификатором Ст; в последнем случае $(В/Ц)_6 = 0,28$.

На рисунке 6 частично приведены результаты экспериментальных исследований влияния на кинетику роста прочности мелкозернистого бетона компонентов, составляющих комплексную полифункциональную добавку и комплекса в целом.

Из результатов данного эксперимента очевиден эффект от комплексной полифункциональной добавки – 0,5 % Ст + 0,25 % СН + 0,25 % СА + + 1 % УДМК – как в сравнении по темпу роста, так и по уровню прочности мелкозернистого бетона.

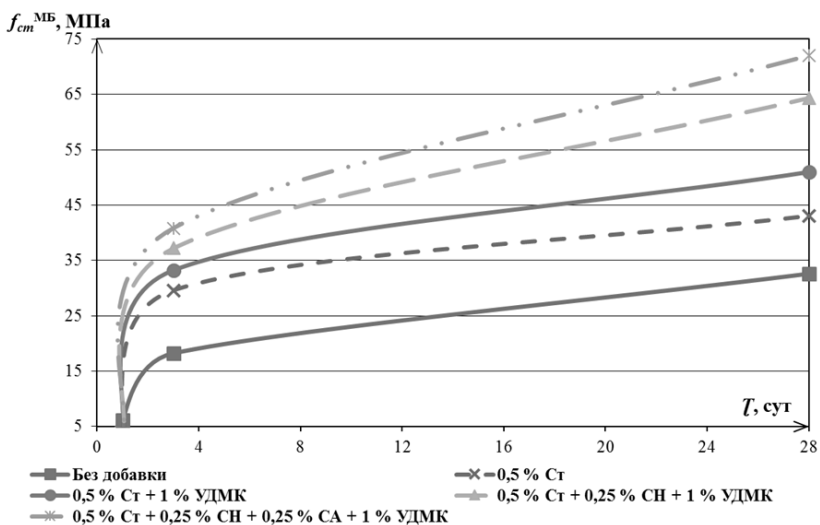


Рисунок 6. Кинетика роста прочности на сжатие мелкозернистого бетона, твердевшего в нормально-влажностных условиях

РЕЗУЛЬТАТЫ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Оценку влияния компонентов и добавки в целом на прочность бетона (в данном случае и при оценке данных для бетона с крупным заполнителем) осуществили в соответствии с положениями методик источников [6, 7]. Статистическую обработку полученных результатов провели по данным испытаний образцов проектного возраста (28 суток), твердевших в нормально-влажностных условиях.

Приведенные далее данные относятся к образцам, изготовленным с применением пластификатора Стахемент 2000-М Ж 30 при постоянном водоцементном отношении бетона ($V/C \sim 0,28$).

Использовали нелинейный трехфакторный план второго порядка. Выбрали интервалы варьирования факторов (таблица 3).

Интервалы варьирования факторов

Код	Значение кода	Значение фактора		
		x1	x2	x3
Основной уровень	0	0,5	0,25	1
Интервал варьирования	Dxi	0,5	0,25	1
Верхний уровень	+	1,0	0,5	2
Нижний уровень	-	0	0	0

Факторы:

- x_1 – количество добавки СН в % от массы цемента;
- x_2 – количество добавки СА в % от массы цемента;
- x_3 – количество добавки УДМК в % от массы цемента.

После статистической обработки (в статье не приводится) получили уравнение регрессии для оценки прочности мелкозернистого бетона:

$$y = 71,48 + 7,85 x_1 + 2,50 x_2 + 8,28 x_3 - 8,04 x_1 x_1 - 2,09 x_2 x_2 - 7,49 x_3 x_3 + 1,99 x_1 x_2 + 3,06 x_1 x_3, \text{ МПа.} \quad (3)$$

Для графической интерпретации полученных результатов один фактор приняли фиксированным, решили уравнение и построили графики (рисунки 7–9), отражающие роль соотношения в добавке компонентов: СН; СА и УДМК при фиксированном содержании пластификатора в полифункциональной добавке.

Расчетные данные, полученные по уравнению регрессии (3), отличаются от экспериментальных всего лишь на 1 %...2 %, что свидетельствует о возможности его использования для практических расчетов.

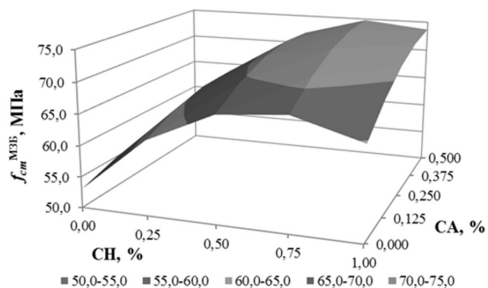


Рисунок 7. Влияние факторов x_1 (содержание СН) и x_2 (содержание СА) на параметр y (прочность мелкозернистого бетона) при УДМК = 1 % от МЦ

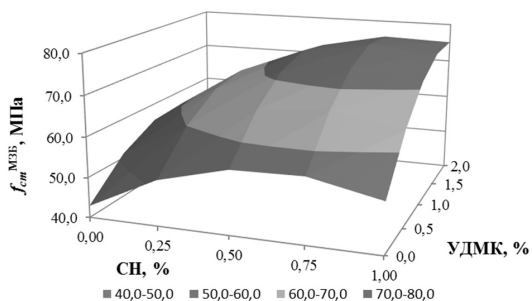


Рисунок 8. Влияние факторов x_1 (содержание СН) и x_3 (содержание УДМК) на параметр y (прочность мелкозернистого бетона) при СА = 0,25 % от МЦ

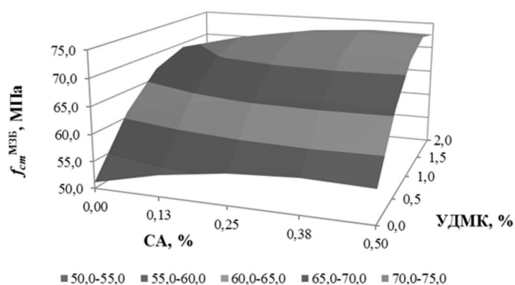


Рисунок 9. Влияние факторов x_2 (содержание СА) и x_3 (содержание УДМК) на параметр y (прочность мелкозернистого бетона) при СН = 0,5 % от МЦ

Вобщем комплексе экспериментов были выполнены аналогичные исследования с тяжелым конструкционным бетоном (включая высокопрочный, характеризующийся прочностью 100...120 МПа),

содержащим крупный заполнитель. Полученные результаты позволили выявить рациональное соотношение компонентов полифункциональной добавки, соответствующее: суперпластификатора на основе поликарбоксилатных смол – 0,25 %...0,5 % от массы цемента, ультрадисперсного микрокремнезема (SiO_2) – 0,25 %...1,0 % от МЦ, ускорителя твердения – сульфата натрия (Na_2SO_4) – 0,35 %...0,5 % от МЦ и уплотняющей структуру добавки – сульфата алюминия ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) – 0,15 %...0,25 % от МЦ, при меньших значениях для тяжелого конструкционного бетона класса $\leq \text{C}50/60$ и больших значениях для высокопрочного, особо плотного бетона класса $\geq \text{C}70/85$ (прочностью $f_{\text{cm},28} \geq 100$ МПа).

Экспериментально обоснована зависимость роста прочности цементного камня и конструкционного тяжелого бетона, включая высокопрочный ($f_{\text{cm},28} \geq 100$ МПа), от входящих в состав полифункциональной добавки компонентов и подтверждено преимущество применения всего комплекса в целом, обеспечившего рост прочности цементного камня в начальные 24 ч нормально-влажностного твердения до 30 % и к проектному (28 сут) возрасту до 25 %, а цементного бетона до 50 % и 40 %, соответственно, по сравнению с бетоном, содержащим равное количество примененного в добавке пластификатора, и до 80 % и 70 % в сравнении с бетоном без добавок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование методов математической статистики как на стадии планирования экспериментов, так и при обработке результатов исследований кинетики роста прочности на сжатие цементного камня и цементного бетона, содержащих в своем составе комплексную полифункциональную добавку, позволило оценить роль ее составляющих и комплекса в целом на изменение (рост прочности) бетона в процессе твердения.

На этой основе получена и запатентована [4] новая химическая добавка в бетон полифункционального действия, позволяющая повысить темп роста прочности бетона (и снизить за этот счет энергетические затраты на ускорение его твердения) и улучшить

механические характеристики (прочность на сжатие и растяжение при изгибе, усадочные явления), а также эксплуатационные свойства – морозостойкость, водонепроницаемость, защитную способность по отношению к стальной арматуре и другие [8].

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Модификатор бетона МБ-01. Технические условия : ТУ 5743-083-46854090-98. – Введ. 01.01.99. – М. : Госстандарт, 1998. – 28 с.
2. Модификатор бетона Эмбэлит. Технические условия : ТУ 5870-176-46854090-04. – Введ. 02.03.2004. – М. : Госстандарт, 2004. – 27 с.
3. Комплексный модификатор бетона и способ его приготовления : Евраз. пат. 002535 / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, Н. Ф. Жигулев. – Оpubл. 27.06.2002.
4. Комплексная добавка для ускорения твердения и повышения прочности бетона : Евраз. пат. 035404 / Э. И. Батяновский, Н. С. Гуриненко. – Оpubл. 08.06.2020.
5. Химическая добавка для ускорения твердения цемента : пат. 21123 ВУ МКИ С 04 В 22/08 / Н. С. Гуриненко, Э. И. Батяновский. – Оpubл. 10.03.2017.
6. Бабицкий, В. В. Планирование эксперимента : учебно-метод. пособие по проведению инженерных экспериментов и обработке полученных результатов / В. В. Бабицкий, Я. Н. Ковалев, В. Д. Якимович. – Минск : БНТУ, 2003. – 48 с.
7. Адлер, Ю. П. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю. П. Адлер, Е. В. Маркова, Ю. В. Грановский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 279 с.
8. Гуриненко, Н. С. Технология и свойства бетона с полифункциональной добавкой, содержащей ультрадисперсный микрокремнезем : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Н. С. Гуриненко ; Беларус. нац. технич. у-т. – Минск, 2020. – 21 с.

REFERENCES

1. *Modifikator betona MB-01. Tekhnicheskiye usloviya* [Concrete modifier MB-01. Technical conditions] : TU 5743-083-46854090-98. Introduced: 01.01.99. Moscow: Gosstandart, 1998. 28 p. (rus)
2. *Modifikator betona Embelit. Tekhnicheskiye usloviya* [Concrete modifier Embelit. Technical conditions] : TU 5870-176-46854090-04. Introduced: 02.03.2004. Moscow : Gosstandart, 2004. 27 p. (rus)
3. Complex modifier of concrete and method of its preparation: Evraz. pat. 002535 / S. S. Kaprielov, A. V. Sheinfeld, N. F. Zhigulev. Publ. 02.06.2002. (rus)
4. Complex additive to accelerate the hardening and increase the strength of concrete: Evraz. pat.035404 / N. S. Gurinenko, E. I. Batyanovskiy. Publ. 08.06.2020 (rus)
5. Chemical additive to accelerate the hardening of cement: Pat. 21123 BY MKI C 04 B 22/08 / N. S. Gurinenko, E. I. Batyanovsky. Publ. 10.03.2017. (rus)
6. Babitskiy V. V., Kovalev Ya. N., Yakimovich V. D. *Planirovanie eksperimenta: ychebno-metod. posobie po provedeniyu inzhenernykh eksperimentov i obrabotke polychennykh rezyltатов* [Experiment planning: teaching aid for conducting engineering experiments and processing the results]. Minsk: BNTU, 2003. 48 p. (rus)
7. Adler Yu. P., Markova E. V., Granovsky Yu. V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimalnykh ysloviy* [Planning an experiment in the search for optimal conditions]. Moscow: Nauka, 1976. 279 p. (rus)
8. Gurinenko N. S. *Technology and properties of concrete with a multifunctional additive, containing microsilica ultra dispersible*: author. dis. ... cand. tech. sciences: 05.23.05; Belarusian. nat. technical u-t. Minsk, 2020. 21 p. (rus)

Статья поступила: 22.09.2020

Received: 22.09.2020