



doi: 10.18720/CUBS.74.3

Полифункциональный химический модификатор гипсоцементных композиций

Polyfunctional chemical modifier for gypsum cement compositions

Р.Х. Мухаметрахимов^{1*}, А.Р. Галаутдинов²

Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Россия

R. Mukhametrakhimov^{1*}, A. Galautdinov²

Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

гипс;
цемент;
смешанное вяжущее;
комплексная добавка;
полифункциональная добавка;
химический модификатор

KEYWORDS

gypsum;
cement;
mixed binder;
complex additive;
polyfunctional additive;
chemical modifier

АННОТАЦИЯ

В технологии гипсоцементно-пуццолановых вяжущих применяется широкий спектр химических модифицирующих добавок. Более широкие возможности в регулировании процессов схватывания и твердения вяжущих на основе гипса и портландцемента имеют комплексные химические добавки, обладающие полифункциональностью действия. В этой связи разработка полифункциональных комплексных добавок с целью повышения эксплуатационных свойств гипсоцементно-пуццолановых композиций является актуальной задачей и вызывает необходимость выполнения экспериментальных исследований. Цель настоящей работы состоит в изучении особенностей взаимодействия химических модификаторов структуры и свойств гипсоцементно-пуццолановых вяжущих, выявлении механизмов их синергетического взаимодействия, разработке и оптимизации состава полифункциональной КД, позволяющей повысить комплекс эксплуатационных свойств гипсоцементно-пуццоланового камня на основе низкомарочного гипсового вяжущего. В результате проведенных исследований установлен механизм синергетического взаимодействия суперпластификатора «Бест-ТБ», поликарбоксилатного гиперпластификатора «Одолит-К», кремнийорганического соединения «N-октилтриэтоксисилан». С применением данных химических модификаторов разработана полифункциональная комплексная добавка позволяющая повысить комплекс эксплуатационных свойств гипсоцементно-пуццолановых композиций. На основе математического планирования эксперимента определены оптимальные дозировки вышеуказанных химических добавок в составе смеси. Разработанная полифункциональная комплексная добавка оптимального состава позволяет повысить коэффициент размягчения изделий на основе исследуемого типа вяжущего до 0,98, предел прочности при изгибе – на 86%, морозостойкость – в 4,2 раза.

ABSTRACT

The wide range of chemical modifying admixtures is used in gypsum-cement-puzzolan binders production. Complex chemical admixtures with multi-functionality of the effect have more powerful capabilities in controlling setting process of binders based on gypsum and portland cement. In this regard, production of the polyfunctional complex admixtures with the purpose of improving the performance properties of gypsum-cement-puzzolan compositions is a relevant objective and necessitates undertaking experimental studies. This work objective consists in studying characteristics of interreaction of chemical modifiers in structure and gypsum-cement-puzzolan binders' properties, in determining their mechanism of synergistic interaction, in production and optimization polyfunctional complex admixture (CA) composition that helps to improve performance properties of gypsum-cement-puzzolan stone based on low-graded gypsum binder. In consequence of undertaken studies the mechanism of synergistic interaction of superplasticizing admix "Best-TB", polycarboxylate superplasticizer "Odolit-K", organosilicone compound "N-oktiltriétoxisilan" was determined. With the use of these chemical modifiers the polyfunctional complex admixture that helps to improve the performance properties of gypsum-cement-puzzolan compositions was produced. Based on mathematical experimental design techniques optimum doses of above-named chemical admixtures in composition of mixture were determined. Elaborated polyfunctional complex

admixture with tailored composition helps to raise coefficient of softening of the products based on studying type of binder to 0.98, ultimate bending strength – by 86%, frost resistance – by a factor of 4.2

Содержание

| | | |
|----|-------------------------|----|
| 1. | Введение | 18 |
| 2. | Методы | 19 |
| 3. | Результаты и обсуждение | 20 |
| 4. | Заключение | 23 |

1. Введение

В технологии гипсоцементно-пуццолановых вяжущих (ГЦПВ) применяется широкий спектр модифицирующих добавок, таких как добавки для регулирования кинетики начального структурообразования и твердения, пластифицирующие добавки (ПД), гидрофобизирующие добавки (ГД). При этом номенклатура модифицирующих добавок для цементных вяжущих значительно шире, чем для гипсовых вяжущих и строительных материалов на их основе [1]. Следует отметить, что работа модифицирующих добавок в значительной степени зависит от состава вяжущего, количества и качества соединений, образующихся при его гидратации, способа их введения и др. [2,3], а также щелочности среды. В этой связи в композициях на основе гипсовых и смешанных вяжущих при пониженном содержании портландцемента (ПЦ) в составе смеси не всегда достигается ожидаемый результат. Следует отметить, что более широкие возможности в регулировании процессов схватывания и твердения вяжущих на основе гипса и ПЦ имеют комплексные химические добавки, состоящие из веществ, принадлежащих к разным классам и способствующие созданию оптимальных условий структурообразования изделий [4–7]. Они, как правило, обладают полифункциональностью действия и взаимно усиливают полезный эффект, обеспечиваемый каждой из добавок, входящих в состав комплексной добавки, в отдельности. Это оказывает положительное влияние на кинетику структурообразования и твердения, формирование поровой структуры, прочностные показатели и долговечность композитов с их применением [8–14]. Поэтому исследование работы современных модифицирующих добавок, в том числе предназначенных для цементных смесей, в гипсоцементно-пуццолановых композициях, а также разработка полифункциональных комплексных добавок (КД) с целью повышения их эксплуатационных свойств является актуальной задачей и вызывает необходимость выполнения экспериментальных исследований.

В работе Гординой А.Ф., Яковлева Г.И., Рахимовой Н.Р. и др. [15] исследовано влияние комплексной тонкодисперсной добавки, включающей металлургическую пыль и многослойные углеродные нанотрубки. Показано, что введение добавки в состав композиций позволяет повысить прочностные характеристики при изгибе и сжатии на 70,5 и 138% соответственно, увеличить водостойкость материала за счет возникновения синергетического эффекта от действия модификаторов.

В работе [16] изучено влияние пластифицирующих и водоудерживающих добавок, а также редиспергируемых полимерных порошков на свойства ГЦПВ. Показано, что при использовании комплексных модифицирующих полимерных добавок, прочность гипсовых вяжущих увеличивается на 20-23%, пористость снижается в 1,5 раза, а водостойкость возрастает на 10-15%. При этом в данных исследованиях содержание ПЦ в составе ГЦПВ составляло 33-36%, АМД – 7-14%.

Поторочиной С.А., Новиковой В.А. и др. [17] изучено влияние ПД на основе поликарбоксилата и комплексного модификатора на физико-технические характеристики гипсовых материалов. Показано, что применение вышеуказанных добавок способствуют улучшению целого комплекса свойств: снижению водогипсового отношения вяжущего, интенсификации процессов гидратации и твердения двуводного сульфата кальция, формированию плотного и прочного гипсового камня. Однако коэффициент размягчения полученных составов не превышает 0,38.

В работах Рахимова Р.З., Алтыкиса М.Г., Халиуллина М.И. [18–21] рассмотрено влияние КД на основе извести, молотой керамзитовой пыли, молотого доменного шлака и суперпластификатора (СП) на состав и структуру композиционного гипсового вяжущего. Авторами установлено, что применение данных комплексных добавок обеспечивает получение композиционного гипсового вяжущего с повышенными физико-техническими свойствами.

В работах Коровякова В.Ф. [22,23] рассмотрено модифицирование гипсовых вяжущих органоминеральным модификатором, включающим ПЦ, кремнеземистую добавку и СП. По мнению автора, применение данного модификатора позволит повысить скорость и степень гидратации ПЦ в композиционном гипсовом вяжущем и увеличить активность кремнеземистых компонентов, а также повысить реакционную способность трехвалентного алюмината, что приведет к повышению прочности и долговечности сформировавшейся структуры затвердевшего вяжущего во времени.

Таким образом, зная характер действия химических добавок, становится возможным регулировать кинетику начального структурообразования и твердения, обеспечить условия формирования устойчивых

структур гипсоцементного камня, управлять поровой структурой и получать изделия на его основе с повышенными эксплуатационными свойствами и водостойкостью.

Цель настоящей работы – изучить особенности взаимодействия химических модификаторов структуры и свойств ГЦПВ, выявить механизмы их синергетического взаимодействия, разработать полифункциональную КД, позволяющую повысить комплекс эксплуатационных свойств гипсоцементно-пущолаанового камня (ГЦПК) на основе низкомарочного гипсового вяжущего и произвести оптимизацию ее состава путем реализации трехфакторного плана второго порядка на гиперкубе.

2. Методы

Примененные материалы

1) Полуводный гипс марки Г6 БИ производства ООО «Аракчинский гипс», произведенный по ГОСТ 125-79. Выбор полуводного гипса марки Г6БИ, как компонента вяжущего, обусловлен большими объемами его производства на территории РФ, а также его невысокой стоимостью в связи с относительно простой технологией изготовления.

2) Портландцемент ПЦ500-Д0Н Белгородского цементного завода. Выбор Белгородского портландцемента марки ПЦ500Д0 с высоким содержанием алюминатной фазы обусловлен особенностями взаимодействия ПД с данным видом ПЦ. Известно, что эффективность работы ПД в цементных смесях в значительной мере зависит от содержания алюминатной фазы в составе ПЦ. С увеличением содержания данной фазы эффективность работы ПД снижается. В этой связи особый интерес представляют исследования направленные на разработку гипсоцементно-пущолаановых композиций с повышенными физико-механическими характеристиками с применением ПЦ с высоким содержанием алюминатной фазы.

3) минеральная добавка – метакраолин с гидравлической активностью 1238 мг/г, выбранный из широкого спектра природных и техногенных АМД с учетом выполненных ранее исследований [24,25].

4) Вода водопроводная питьевая, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732.

5) Пластифицирующие добавки:

– СП «БЕСТ-ТБ», производства ООО «Инновационные Технологии», относится к СП первой группы и представляет собой сополимер на основе эфиров карбоновых кислот с добавлением фосфатного компонента;

– пластификатор первой группы с самоуплотняющим действием на основе карбоксилатов «Одолит-К» произведенный ООО «Сервис-Групп» по ТУ 5745-01-96326574-08, представляет собой полупрозрачную вязкую жидкость в водном растворе без содержания хлора;

– водный раствор поликарбоксилатного эфира «Glenium® Ace 430» производства ООО «BASF Строительные системы»: коричневая жидкость плотностью 1,04 г/см³, рН при 20°С – 5,5, максимальное содержание хлоридов ≤ 0,01%, максимальное содержание щелочей < 0,6% (Na₂O – эквивалент).

6) Гидрофобизирующая добавка: кремнийорганическое соединение «N-октилтриэтоксисилан» [C₈H₁₇Si(OC₂H₅)₃] производства группы компаний «Dow Corning», представляет собой прозрачную жидкость с относительной плотностью при температуре 25°С – 0,875 г/см³; чистота – 98%; содержание летучих органических составляющих – 329 г/л;

Методы исследований

Пределы прочности при сжатии и изгибе ГЦПК определяли на образцах-балочках размером 4x4x16 см, по методике, описанной в ГОСТ 23789-79. Оценку водостойкости проводили по величине коэффициента размягчения, равного отношению предела прочности при сжатии образцов в сухом состоянии к пределу прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии. Водонасыщение производили в течение 24 ч. Морозостойкость образцов ГЦПК изучалась по методике ГОСТ 10060.1-95. Исследования выполнялись на образцах размером 100x100x10 мм.

Для оптимизации состава полифункциональной КД использован трехфакторный план второго порядка на гиперкубе, близкий к Д-оптимальному с шестью точками в центре плана, позволяющий описать искомые зависимости в виде полинома второй степени вида:

$$y = b_0 + \sum b_i x_i + \sum b_{ij} x_{ij} + \sum b_{ii} x_i^2 \quad (1)$$

где: x – кодированные значения переменных;

b – коэффициенты уравнений регрессий.

По формуле полинома второй степени, приведенной выше, рассчитывали коэффициенты уравнений регрессий и производили их анализ в следующей последовательности:

1. Оценка значимости уравнений регрессий.

2. Расчет теоретических значений отклика по полученному уравнению регрессии с учетом только значимых коэффициентов.

3. Расчет дисперсии, характеризующей ошибку опыта:

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_i)^2}{n_0 - 1} \quad (2)$$

4. Определение остаточной суммы квадратов и дисперсии адекватности:

$$S_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{y} - y_v)^2}{N - P - (n_0 - 1)} \quad (3)$$

где P – число значимых коэффициентов.

5. Осуществляли проверку адекватности полученных уравнений по критерию Фишера при доверительной вероятности 95% по формуле:

$$F_{расч} = \frac{S_p^2}{S_y^2} \quad (4)$$

3. Результаты и обсуждение

Изучение механизмов синергетического взаимодействия химических добавок

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить, что при взаимодействии гиперпластификатора (ГП) «Одолит-К» и СП «Бест-ТБ» наблюдается синергетический эффект, который позволяет замедлить кинетику начального структурообразования при увеличении конечной прочности ГЦПК [26].

СП «Бест-ТБ» относится к поверхностно-активным веществам, поэтому его основным свойством является способность молекул адсорбироваться на поверхности частиц вяжущего с образованием очень тонкого слоя, повышающего дзета-потенциал на поверхности частиц. В результате межфазовая энергия сцепления уменьшается и увеличивается степень их дезагрегация, а также снижается коэффициент трения. Возникновение одноименного электрического заряда при адсорбции молекул СП на поверхности частиц вяжущего исключает возможность их сцепления при действии электростатических сил, снижая, тем самым, вязкость суспензии. Вместе с тем фосфатный компонент, входящий в состав СП «Бест-ТБ», способствуют образованию на поверхности частиц гипса защитной пленки из труднорастворимых соединений, в результате чего схватывание гипса замедляется.

Особенностью ГП «Одолит-К» является его состав – это поликарбоксилатный полимер. Его молекулы наряду с основной имеют боковые цепи. Основная цепь ГП «Одолит-К» адсорбируется на частицах вяжущего, а боковые направлены от них в водное пространство. Они создают эффект взаимного отталкивания частиц, называемый стерическим или пространственным. Этим обусловлена диспергация флоккул вяжущего и пластифицирующе-водоредуцирующий эффект добавки. При этом только небольшая часть частиц вяжущего покрыта полимером и свободной поверхности достаточно для доступа воды и протекания реакции гидратации.

Механизм синергетического эффекта исследуемых химических добавок, по нашему мнению, состоит в том, что при совместном введении в состав смеси СП «Бест-ТБ» и ГП «Одолит-К» действие электростатических сил отталкивания частиц вяжущего, возникающее при адсорбции молекул СП, дополняется стерическим эффектом, возникающим за счет действия боковых гидрофобных цепей ГП. Тем самым увеличивается диспергация молекул вяжущего, чем обуславливается значительное снижение водопотребности и возрастание прочностных показателей готовых изделий.

Молекулы ГД «N-Октилтриэтоксисилан» состоят из двух частей, противоположных по своей природе и свойствам. На одном конце молекулы находится гидрофильная (полярная) группа $(OC_2H_5)_3$, которая является источником сильного молекулярного взаимодействия, а потому хорошо растворима в воде. Вторая часть молекулы, гидрофобная, образована несколькими достаточно длинными цепями, насыщенными углеводородом $(C_8H_{17}Si)$. Для углеводородных цепочек гидрофобных молекул характерна тенденция к взаимному отталкиванию, благодаря которой они образуют щеткообразную структуру на адсорбирующихся их поверхностях. В результате между молекулами воды и молекулами гидрофобного вещества, адсорбированного на минеральных частицах, возникает отталкивание. Введение ГД «N-Октилтриэтоксисилан» и адсорбация ее молекул на частицах вяжущего с ориентацией боковых цепочек в

водное пространство приводит к дополнительному отталкиванию диспергированных молекул вяжущего и молекул воды при сохранении эффекта гидрофобизации.

Вместе с тем следует отметить, что в ряде случаев возникают условия для химического взаимодействия компонентов СП и ГП, что значительно снижает эффективность их совместной работы и приводит к снижению исследуемых показателей готовых изделий. Так, к примеру, ГП «Glenium® Ace 430» показал лучшие результаты по критерию повышения пределов прочности при изгибе и сжатии ГЦПК по сравнению с ГП «Одолит-К». Однако при его взаимодействии с СП «БЕСТ-ТБ» синергетического эффекта не наблюдается, напротив, наблюдается снижение исследуемых показателей.

Вместе с тем следует отметить, что существенной особенностью ГП и ГД является возможность конструирования различных видов их молекул, в частности боковых цепочек. По нашему мнению в ряде случаев возникают условия для химического взаимодействия боковых цепочек данных добавок, что значительно снижает эффективность их совместной работы и приводит к снижению исследуемых показателей готовых изделий. Так, к примеру, ГП «Glenium® Ace 430» показал лучшие результаты по критерию повышения пределов прочности при изгибе и сжатии ГЦПК по сравнению с ГП «Одолит-К». Однако при его взаимодействии с СП «БЕСТ-ТБ» синергетического эффекта не наблюдается, напротив, наблюдается снижение исследуемых показателей. Так же следует отметить, что чрезмерное введение компонентов КД напротив приводит к возникновению их блокирующего действия на частицы ГЦПВ.

Оптимизация полифункционального химического модификатора

Оптимизация содержания модифицирующих добавок в составе полифункциональной КД производилась путем реализации трехфакторного плана второго порядка на гиперкубе. В качестве вяжущего приняли ГЦПВ, содержащее (%): гипс – 76%, ПЦ – 20%; АМД метакаолин – 4%. В качестве исходных независимых переменных определены такие факторы, как содержание СП (0,1-0,9); карбоксилатного ГП (0,5-2,5); ГД (0-0,2) в % от массы ГЦПВ. В качестве СП использована добавка «Бест-ТБ», в качестве ГП – «Одолит-К», в качестве ГД – кремнийорганическое соединение «N-октилтриэтоксисилан».

Уровни варьирования независимых переменных приведены в таблице 1.

Таблица 1. Уровни варьирования независимых переменных

| Факторы | Наименование факторов | Уровни варьирования | | |
|----------------|--------------------------------------|---------------------|-----|------|
| | | -1 | 0 | +1 |
| X ₁ | Содержание СП, в % от массы вяжущего | 0,25 | 0,5 | 0,75 |
| X ₂ | Содержание ГП, в % от массы вяжущего | 0,75 | 1,5 | 2,25 |
| X ₃ | Содержание ГД, в % от массы вяжущего | 0,05 | 0,1 | 0,15 |

В качестве отклика выбраны предел прочности при изгибе ГЦПК ($R_{изг}$), коэффициент размягчения (K_p) и морозостойкость (F). Произведенная обработка результатов математического планирования, позволила получить следующие математические зависимости:

$$1: R = -8,74 + 41,38x_1 + 14,45x_2 + 143,85x_3 - 0,32x_1x_2 + 6,67x_1x_3 - 9,21x_2x_3 - 40,195x_1^2 - 4,29x_2^2 - 655,43x_3^2$$

$$2: K_p = 0,42 + 0,698x_1 + 0,26x_2 + 3,26x_3 + 0,063x_1x_2 + 0,38x_1x_3 + 0,19x_2x_3 - 0,77x_1^2 - 0,09x_2^2 - 17,97x_3^2$$

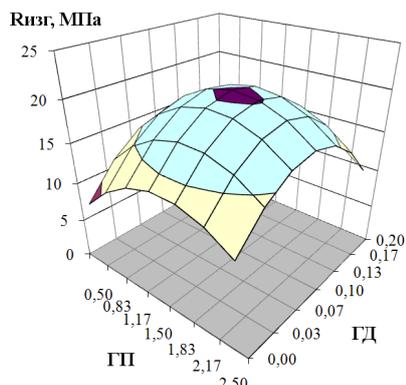
$$3: F = -56,19 + 151,79x_1 + 86,52x_2 + 758,97x_3 + 15,87x_1x_2 + 238,096x_1x_3 + 79,365x_2x_3 - 180,27x_1^2 - 27,497x_2^2 - 4506,7x_3^2$$

Для определения адекватности полученных уравнений регрессий, произведена оценка их статистической значимости с табличным значением (критерий Фишера). Результаты представлены в таблице 2.

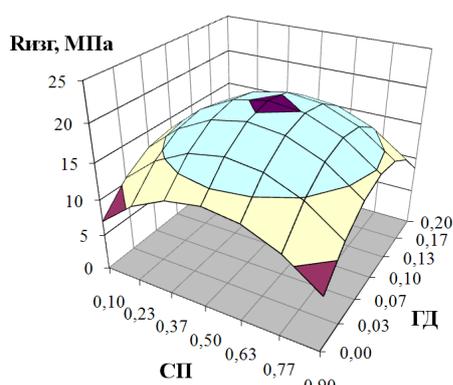
Таблица 2. Статистическая оценка полученных зависимостей

| № формулы | Критерий Фишера | |
|-----------|--------------------|--------------------|
| | Табличное значение | Расчетное значение |
| 1 | 5,05 | 4,99 |
| 2 | 5,05 | 4,31 |
| 3 | 5,05 | 2,29 |

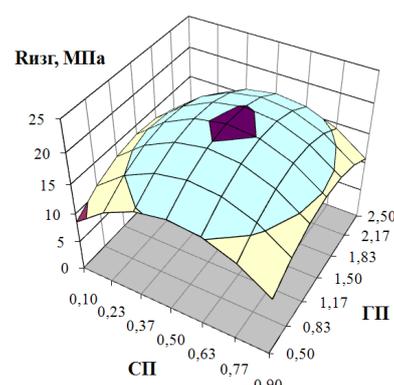
На рисунках 1-3 приведена графическая интерпретация результатов обработки математических моделей (формулы 1-3).



$X_1 - \text{const} = 0,5\%$ от массы вяжущего

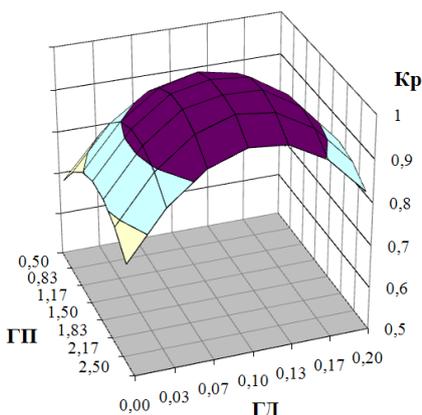


$X_2 - \text{const} = 1,5\%$ от массы вяжущего

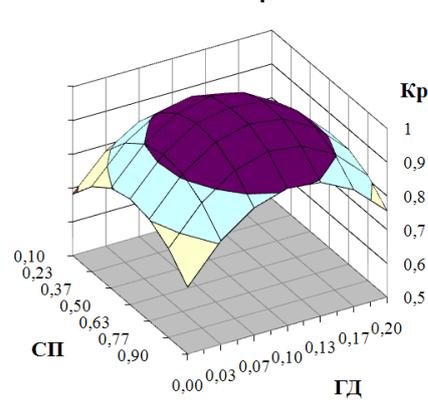


$X_3 - \text{const} = 0,1\%$ от массы вяжущего

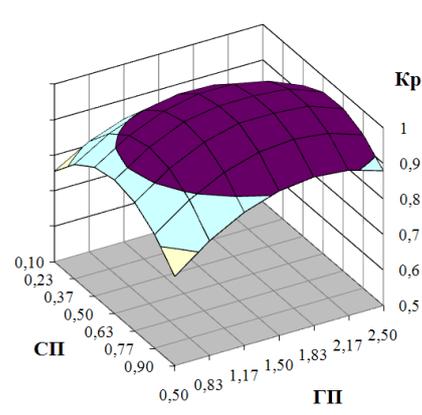
Рисунок 1. Влияние вида и содержания модифицирующих добавок на предел прочности при изгибе ГЦПК



$X_1 - \text{const} = 0,5\%$ от массы вяжущего

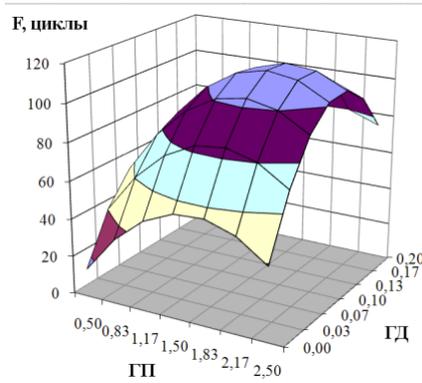


$X_2 - \text{const} = 1,5\%$ от массы вяжущего

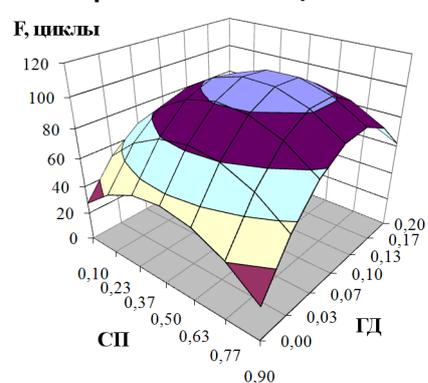


$X_3 - \text{const} = 0,1\%$ от массы вяжущего

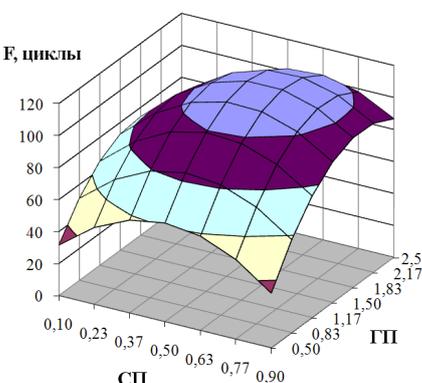
Рисунок 2. Влияние вида и содержания модифицирующих добавок на коэффициент размягчения ГЦПК



$X_1 - \text{const} = 0,5\%$ от массы вяжущего



$X_2 - \text{const} = 1,5\%$ от массы вяжущего



$X_3 - \text{const} = 0,1\%$ от массы вяжущего

Рисунок 3. Влияние вида и содержания модифицирующих добавок на морозостойкость ГЦПК

Как следует из математической зависимости (1) и рисунка 1, с увеличением расходов ГП и СП в составе ГЦПК наблюдается рост пределов прочности при изгибе ГЦПК. Совместное повышение дозировок ГП с ГД, СП с ГД, СП с ГП приводит к постепенному повышению прочности, а затем к его снижению. Понижение прочности ГЦПК при повышении дозировок СП, ГП и ГД, по-видимому, объясняется блокирующим действием на частицы вяжущего указанных добавок, что особенно ясно проявляется при их чрезмерном введении в состав смеси.

Коэффициент размягчения (математическая зависимость 2 и рисунок 2) ГЦПК уменьшается при повышении дозировки СП и увеличивается при совместном повышении дозировок ГП и ГД.

Увеличение морозостойкости, как следует из математической зависимости (3) и рисунка 3, происходит при повышении дозировки ГД, а также при одновременном повышении содержания добавок СП и ГП.

Из рисунков 1-3 видно, что оптимальное содержание модифицирующих добавок заметно влияет на эксплуатационные характеристики ГЦПК, такие как предел прочности при изгибе, коэффициент размягчения и морозостойкость. На основе математического планирования эксперимента определены оптимальные дозировки химических модифицирующих добавок в составе смеси: СП – 0,5 %, ГП – 1,5 %, ГД – 0,1% от массы ГЦПВ.

4. Заключение

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Проведенный анализ литературных данных свидетельствует об актуальности вопросов, связанных с изучением взаимодействия химических модификаторов структуры и свойств ГЦПВ при введении в смесь, выявлением области их синергетического взаимодействия с целью комплексного улучшения эксплуатационных свойств получаемых материалов и изделий.

2. Установлен механизм синергетического взаимодействия компонентов полифункциональной КД, содержащей суперпластификатор «Бест-ТБ», поликарбоксилатный гиперпластификатор «Одолит-К», кремнийорганическое соединение «N-октилтриэтоксисилан», заключающийся в том, что действие электростатических сил отталкивания молекул вяжущего, возникающее при адсорбции молекул СП «Бест-ТБ», дополняется стерическим эффектом, возникающим за счет действия боковых гидрофобных цепей поликарбоксилатного ГП «Одолит-К», а также диспергацией молекул вяжущего и молекул воды при адсорбции ГД «N-октилтриэтоксисилан» на частицах вяжущего с ориентацией боковых цепочек в водное пространство при сохранении эффекта гидрофобизации

3. Разработана полифункциональная КД позволяющая повысить комплекс эксплуатационных свойств ГЦПК на основе низкомарочного гипсового вяжущего, и произведена оптимизация ее состава путем реализации трехфакторного плана второго порядка на гиперкубе.

4. На основе математического планирования эксперимента определены оптимальные дозировки химических добавок в составе смеси: СП «Бест-ТБ» – 0,5 %, ГП «Одолит-К» – 1,5 %, ГД «N-октилтриэтоксисилан» – 0.1% от массы исследуемого типа ГЦПВ, что позволяет повысить коэффициент размягчения изделий на основе исследуемого типа вяжущего до 0,98, предел прочности при изгибе – на 86%, морозостойкость – в 4,2 раза.

Литература

- [1]. Мухаметрахимов, Р.Х., Галаутдинов, А.Р. Л.Л.В. Влияния пластифицирующих добавок на основные свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на основе низкомарочного и техногенного сырья // Известия КГАСУ. 2016. № 4 (38). P. 382–387.
- [2]. Амелина, Д.В., Сычева Л.И. Влияние химических добавок на свойства гипсового вяжущего // Успехи в химии и химической технологии. 2010. № 6. P. 41–43.
- [3]. Дребезгов, Д.А., Чернышева, Н.В., Капуста, И.Н., Хлебникова И.С. Влияние химических модификаторов на свойства композиционных гипсовых вяжущих // Эффективные строительные композиты. БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. P. 143–150.
- [4]. Мухаметрахимов, Р.Х., Галаутдинов А.Р. Механоактивированное гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе модифицированного низкомарочного сырья // Известия КГАСУ. 2018. № 1 (43), P. 187–195.
- [5]. Butakova M.D., Gorbunov S.P. Study of the Influence of Complex Additives on Properties of the Gypsum-Cement-Puzzolan Binder and Concretes on its Basis // Procedia Eng. Elsevier, 2016. Vol. 150. P. 1461–1467.
- [6]. Akhlaghi O. et al. Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement // Cem. Concr. Res. Pergamon, 2017. Vol. 101. P. 114–122.
- [7]. Izryadnova O. et al. Role of Polyfunctional Admixture Based on Silica Fume and Carbon Nanotubes in Forming the Structure of Gypsum Cement Composition // Procedia Eng. Elsevier, 2015. Vol. 108. P. 380–386.

References

- [1]. Mukhametrakhimov, R.Kh., Galautdinov, A.R. L.L.V. Vliyaniya plastifitsiruyushchikh dobavok na osnovnyye svoystva gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego na osnove nizkomarochnogo i tekhnogennogo syrya // Izvestiya KGASU. 2016. № 4 (38). P. 382–387.
- [2]. Amelina, D.V., Sycheva L.I. Vliyaniye khimicheskikh dobavok na svoystva gipsovogo vyazhushchego // Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii. 2010. № 6. P. 41–43.
- [3]. Drebezgov, D.A., Chernysheva, N.V., Kapusta, I.N., Khlebnikova I.S. Vliyaniye khimicheskikh modifikatorov na svoystva kompozitsionnykh gipsovykh vyazhushchikh // Effektivnyye stroitelnyye kompozity. BGTU im. V.G. Shukhova, 2015. P. 143–150.
- [4]. Mukhametrakhimov, R.Kh., Galautdinov A.R. Mekhanoaktivirovannoye gipsotsementno-putstsolanovoye vyazhushcheye na osnove modifitsirovannogo nizkomarochnogo syrya // Izvestiya KGASU. 2018. № 1 (43). P. 187–195.
- [5]. Butakova M.D., Gorbunov S.P. Study of the Influence of Complex Additives on Properties of the Gypsum-Cement-Puzzolan Binder and Concretes on its Basis // Procedia Eng. Elsevier, 2016. Vol. 150. P. 1461–1467.
- [6]. Akhlaghi O. et al. Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement // Cem. Concr. Res. Pergamon, 2017. Vol. 101. P. 114–122.
- [7]. Izryadnova O. et al. Role of Polyfunctional Admixture Based on Silica Fume and Carbon Nanotubes in Forming the Structure of

- [8]. Colak A. The long-term durability performance of gypsum–Portland cement–natural pozzolan blends // *Cem. Concr. Res.* Pergamon, 2002. Vol. 32, № 1. P. 109–115.
- [9]. Hossain M.M. et al. Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2016. Vol. 116. P. 128–140.
- [10]. Talero R. Expansive Synergic Effect of ettringite from pozzolan (metakaolin) and from OPC, co-precipitating in a common plaster-bearing solution: Part I: By cement pastes and mortars // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2010. Vol. 24, № 9. P. 1779–1789.
- [11]. Camarini G., De Milito J.A. Gypsum hemihydrate–cement blends to improve renderings durability // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2011. Vol. 25, № 11. P. 4121–4125.
- [12]. Turanli L., Uzal B., Bektas F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements // *Cem. Concr. Res.* Pergamon, 2005. Vol. 35, № 6. P. 1106–1111.
- [13]. Mármol G. et al. Portland cement, gypsum and fly ash binder systems characterization for lignocellulosic fiber-cement // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2016. Vol. 124. P. 208–218.
- [14]. Мухаметрахимов, Р.Х., Галаутдинов А.Р. Механоактивированное гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе модифицированного низкомарочного сырья // *Известия КГАСУ.* 2018. № 1. P. 187–195.
- [15]. Гордина, А.Ф., Яковлев, Г.И., Полянских, И.С., Керене, Я., Фишер, Х.Б., Рахимова, Н.Р., Бурьянов А.Ф. Гипсовые композиции с комплексными модификаторами структуры // *Строительные материалы.* 2016. № 1–2. P. 90–95.
- [16]. Манушина, А. С., Ахметжанов, А.М., Потапова Е.Н. Влияние добавок на свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // *Успехи в химии и химической технологии.* 2015. № 7. P. 59–61.
- [17]. Поторочина, С.А., Новикова, В.А., Гордина, А.Ф., Бекмансуров М.Р. Влияние комплексной добавки на основе поликарбоната и углеродных нанотрубок на физико-технические параметры гипсового вяжущего // *Молодые ученые – ускорению научно-технического прогресса в XXI веке. Сборник материалов IV Всероссийской научно-технической конференции аспирантов, магистрантов и молодых ученых с международным участием.* 2016. P. 776–783.
- [18]. Халиуллин, М.И., Гайфуллин, А.Р., Рахимов, Р.З. С.О.В. Влияние комплексной добавки извести, молотой керамзитовой пыли и суперпластификатора на состав и структуру композиционного гипсового вяжущего // *Вестник КТУ.* 2013. Vol. 16, № 19. P. 66–70.
- [19]. Халиуллин, М.И. Г. Водостойкие бесклнкерные композиционные гипсовые вяжущие с добавками промышленных отходов // *Известия КГАСУ.* 2011. № 3. P. 157–165.
- [20]. Алтыкис, М.Г., Халиуллин, М.И., Рахимов, Р.З., Шептицкий С.П. Сырьевая смесь для изготовления литых гипсовых изделий и способ ее приготовления: pat. 2057736 USA. Россия, 1992.
- [21]. Алтыкис, М.Г., Рахимов, Р.З., Шептицкий, С.П., Халиуллин М.И. Добавка к гипсовому вяжущему: pat. 2074137 USA. Россия, 1993.
- [22]. Коровяков, В.Ф., Ферронская А.В. Органо-минеральный модификатор гипсовых вяжущих, строительных растворов, бетонов и изделий на их основе: pat. 2381191 USA. 2010.
- [23]. Коровяков В.Ф. Модифицирование свойств гипсовых вяжущих органоминеральным модификатором // *Сухие строительные смеси.* 2013. № 3. P. 15–17.
- [24]. Мухаметрахимов, Р.Х., Галаутдинов А.Р. Гипсоцементно-пуццолановое вяжущее на основе низкомарочного сырья и отходов промышленности // *Вестник Технологического университета.* 2016. Vol. 19, № 24. P. 56–59.
- Gypsum Cement Composition // *Procedia Eng.* Elsevier, 2015. Vol. 108. P. 380–386.
- [8]. Colak A. The long-term durability performance of gypsum–Portland cement–natural pozzolan blends // *Cem. Concr. Res.* Pergamon, 2002. Vol. 32, № 1. P. 109–115.
- [9]. Hossain M.M. et al. Durability of mortar and concrete made up of pozzolans as a partial replacement of cement: A review // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2016. Vol. 116. P. 128–140.
- [10]. Talero R. Expansive Synergic Effect of ettringite from pozzolan (metakaolin) and from OPC, co-precipitating in a common plaster-bearing solution: Part I: By cement pastes and mortars // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2010. Vol. 24, № 9. P. 1779–1789.
- [11]. Camarini G., De Milito J.A. Gypsum hemihydrate–cement blends to improve renderings durability // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2011. Vol. 25, № 11. P. 4121–4125.
- [12]. Turanli L., Uzal B., Bektas F. Effect of large amounts of natural pozzolan addition on properties of blended cements // *Cem. Concr. Res.* Pergamon, 2005. Vol. 35, № 6. P. 1106–1111.
- [13]. Mármol G. et al. Portland cement, gypsum and fly ash binder systems characterization for lignocellulosic fiber-cement // *Constr. Build. Mater.* Elsevier, 2016. Vol. 124. P. 208–218.
- [14]. Mukhametrakhimov, R.Kh., Galautdinov A.R. Mekhanoaktivirovannoye gipsotsementno-putstsolanovoye vyazhushcheye na osnove modifitsirovannogo nizkomarochnogo syrya // *Izvestiya KGASU.* 2018. № 1. P. 187–195.
- [15]. Gordina, A.F., Yakovlev, G.I., Polyanskikh, I.S., Kerene, Ya., Fisher, Kh.B., Rakhimova, N.R., Buryanov A.F. Gipsovyvye kompozitsii s kompleksnymi modifikatorami struktury // *Stroitelnyye materialy.* 2016. № 1–2. P. 90–95.
- [16]. Manushina, A. S., Akhmetzhanov, A.M., Potapova Ye.N. Vliyaniye dobavok na svoystva gipsotsementno-putstsolanovogo vyazhushchego // *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii.* 2015. № 7. P. 59–61.
- [17]. Potorochina, S.A., Novikova, V.A., Gordina, A.F., Bekmansurov M.R. Vliyaniye kompleksnoy dobavki na osnove polikarboksilata i uglerodnykh nanotrubok na fiziko-tekhnicheskiye parametry gipsovogo vyazhushchego // *Molodyye uchenyye – uskorenuyu nauchno-tekhnicheskogo progressa v XXI veke. Sbornik materialov IV Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii aspirantov, magistrantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiyem.* 2016. P. 776–783.
- [18]. Khaliullin, M.I., Gayfullin, A.R., Rakhimov, R.Z. S.O.V. Vliyaniye kompleksnoy dobavki izvesti, molotoy keramzitovoy pyli i superplastifikatora na sostav i strukturu kompozitsionnogo gipsovogo vyazhushchego // *Vestnik KTU.* 2013. Vol. 16, № 19. P. 66–70.
- [19]. Khaliullin, M.I. G. Vodostoykiye besklнкernye kompozitsionnyye gipsovyvye vyazhushchiye s dobavkami promyshlennykh otkhodov // *Izvestiya KGASU.* 2011. № 3. P. 157–165.
- [20]. Altykis, M.G., Khaliullin, M.I., Rakhimov, R.Z., Shepitskiy S.P. Syryevaya smes dlya izgotovleniya litykh gipsovykh izdeliy i sposob yeye prigotovleniya: pat. 2057736 USA. Rossiya, 1992.
- [21]. Altykis, M.G., Rakhimov, R.Z., Shepitskiy, S.P., Khaliullin M.I. Dobavka k gipsovomu vyazhushchemu: pat. 2074137 USA. Rossiya, 1993.
- [22]. Korovyakov, V.F., Ferronskaya A.V. Organo-mineralnyy modifikator gipsovykh vyazhushchikh, stroitelnykh rastvorov, betonov i izdeliy na ikh osnove: pat. 2381191 USA. 2010.
- [23]. Korovyakov V.F. Modifitsirovaniye svoystv gipsovykh vyazhushchikh organomineralnym modifikatorom // *Sukhiye stroitelnyye smesi.* 2013. № 3. P. 15–17.
- [24]. Mukhametrakhimov, R.Kh., Galautdinov A.R. Gipsotsementno-putstsolanovoye vyazhushcheye na osnove nizkomarochnogo

- [25]. 25. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Lukmanova L. Influence of active mineral additives on the basic properties of the gypsum cementpozzolan binder for the manufacture of building products // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106.
- [26]. Изотов, В.С. Мухаметрахимов, Р.Х., Галаутдинов А.Р. Комплексная добавка: pat. 2519313 USA. Россия: Бюл. № 16, 2014.

syrya i otkhodov promyshlennosti // Vestnik Tekhnologicheskogo universiteta. 2016. Vol. 19, № 24. P. 56–59.

- [25]. Mukhametrakhimov R., Galautdinov A., Lukmanova L. Influence of active mineral additives on the basic properties of the gypsum cementpozzolan binder for the manufacture of building products // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 106.
- [26]. Izotov, V.S. Mukhametrakhimov, R.Kh., Galautdinov A.R. Kompleksnaya dobavka: pat. 2519313 USA. Rossiya: Byul. № 16, 2014.

Контактная информация

- 1.* +79196994422, muhametrahimov@mail.ru
(Мухаметрахимов Рустем Ханифович, к.т.н., доцент)
2. +79874047646, galautdinov89@mail.ru (Галаутдинов Альберт Радикович, к.т.н., старший преподаватель)

Contact information

- 1.* +79196994422, muhametrahimov@mail.ru
(Mukhametrakhimov Rustem, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor)
2. +79874047646, galautdinov89@mail.ru (Galautdinov Albert, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer)

© Мухаметрахимов Р.Х., Галаутдинов А.Р., 2018