

СВОЙСТВА И ФАЗОВЫЙ СОСТАВ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ

Л. Н. Макарова¹, В. В. Шмидт^{1,2}, А. В. Исмагилова¹, В. В. Макаров¹

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова

PROPERTIES AND PHASE COMPOSITION OF CEMENT MORTARS

Lyudmila N. Makarova¹, Vadim V. Schmidt^{1,2}, Alena V. Ismagilova¹, Vyacheslav V. Makarov¹

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Tyumen Higher Military Engineer Command School named after A.I. Proshlyakov, Tyumen, Russia

Аннотация. Введение в состав цементных масс комплексных антифризов на основе формиата кальция, хлорида кальция и суперпластификатора Полипласт СП-1 приводит к изменению фазового состава цементных растворов. Большое значение имеют разработки комплексных модификаторов, которые используются для фазы твердения цементно-измельченных смесей, особенно в условиях низких температур (до -20°C). Фазовые и структурные особенности цементных растворов изучены в недостаточной степени. В связи с этим в работе исследовалось влияние добавок комплексных антифризов на свойства и фазовый состав при структурировании цементных масс. Прочность при сжатии достигает максимального значения (44.8 МПа) при введении в состав цементных паст добавок формиата кальция, хлорида кальция и суперпластификатора. Рентгеноструктурный анализ проводили с использованием дифрактометра ДРОН-3. Используемые методики стандартные. Рентгенограмма образцов доказывает высокую интенсивность отражений гидросиликата кальция

Abstract. Introduction of complex antifreezes based on calcium formate, calcium chloride and superplasticizer Polyplast SP-1 into cement masses leads to changes in the phase composition of cement mortars. Of great importance are the developments of complex modifiers that are used for the hardening phase of cement-crushed mixtures, especially at low temperatures (down to -20°C). The phase and structural characteristics of cement mortars have not been sufficiently studied. In this regard, the work investigated the effect of complex antifreeze additives on the properties and phase composition during the structuring of cement masses. Compressive strength reaches its maximum value (44.8 MPa) with the addition of calcium formate, calcium chloride and superplasticizer to the composition of cement pastes. X-ray diffraction analysis was carried out using a DRON-3 diffractometer. The used methods were standard. The X-ray diffraction patterns of the samples prove the high intensity of reflections of calcium hydrosilicate $d = 9.69 \text{ \AA}$, portlandite $d = 4.921 \text{ \AA}$, $d = 2.632 \text{ \AA}$, which indicates a high degree

$d = 9.69 \text{ \AA}$, портландита $d = 4.921 \text{ \AA}$, $d = 2.632 \text{ \AA}$, что свидетельствует о высокой степени гидратации портландцемента. Совместное использование формиата кальция и хлорида кальция способствует активации гидролиза, а добавление суперпластификатора СП-1 приводит к снижению соотношения В/Ц до 0.20, что ускоряет процесс твердения. Добавки комплексных антифризов увеличивают процентное отношение кристаллической фазы по отношению к аморфной фазе, таким образом, цементные пасты, содержащие комплексные добавки 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$, 3 % CaCl_2 , 2 % СП-1, обладают наибольшим значением степени гидратации (0.70) за счет образования 63%-й кристаллической фазы. Образующиеся новообразования характерны для портландита и гидросиликатов дикальция. Комплексные антифризы в качестве добавки способствуют активизации гидратации в цементных растворах, что подтверждается уровнем степени гидролиза и интегральным значением потери массы. Синергизм процессов структурообразования наблюдается при совместном использовании добавок антифризов в составе цементных масс и, как следствие, повышает прочность цементных растворов, используемых в строительстве при низких климатических температурах.

Ключевые слова: портландит, алит, белит, формиат кальция, хлорид кальция, фазовый состав, цемент, антифризы, рентгенофазовый анализ, суперпластификатор

of hydration of portland cement. The combined use of calcium formate and calcium chloride promotes the activation of hydrolysis, and the addition of superplasticizer SP-1 leads to a decrease in the water-cement ratio to 0.20, which leads to an acceleration of the hardening process. Complex antifreeze additives increase the percentage ratio of crystalline phase to amorphous phase, thus, cement pastes with complex additives of 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$, 3 % CaCl_2 , 2 % SP-1 have the highest value of degree of hydration (0.70) due to the formation of 63 % crystalline phase. Newly formed structures are typical for portlandite and dicalcium hydrosilicates. Complex antifreezes as an additive promote the activation of hydration in cement mortars, and the level of the degree of hydrolysis and the integral value of mass loss confirm this. Synergism of structure formation processes is observed at joint use of antifreeze additives in the composition of cement masses and, as a result, increases the strength of cement mortars used in construction at low climatic temperatures.

Key words: portlandite, alit, belite, calcium formate, calcium chloride, phase composition, cement, antifreeze, X-ray phase analysis, superplasticizer

Для цитирования: Свойства и фазовый состав цементных растворов / Л. Н. Макарова, В. В. Шмидт, А. В. Исмагилова, В. В. Макаров. – DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-79-88. – Текст : непосредственный // Архитектура, строительство, транспорт. – 2024. – № 1(107). – С. 79–88.

For citation: Makarova, L. N., Schmidt, V. V., Ismagilova, A. V., & Makarov, V. V. (2024). Properties and phase composition of cement mortars. Architecture, Construction, Transport, (1(107)), pp. 79–88. (In Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2024-1-79-88.

1. Введение

Структурные особенности фаз цементного камня формируются в зависимости от технологических схем подготовки пасты, массовой доли

и количественного состава противоморозных и других добавок, в связи с этим кристаллизующиеся структуры, образующиеся при различных условиях, в недостаточной степени описаны в

литературе. Комплексные добавки, которые обеспечивают хорошие результаты при отвердевании бетона в условия минусовых температур, – это смеси на основе CaCl_2 , $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$, NaNO_2 , K_2CO_3 и т. д. [1, 2, 3].

Особый интерес в последнее время вызывают добавки на основе ацетатов, формиатов натрия и кальция. Главным образом процессы гидратации и твердения цементных растворов, а также структурные и фазовые особенности недостаточно изучены. В результате процесса отвердевания цементного раствора с противоморозными добавками формируется структура цементного камня, обладающая улучшенными физико-техническими свойствами.

Задачей исследования является изучение процессов структурообразования, прочности на сжатие, степени гидратации цементных систем, обусловленных введением комплексных добавок антифризов. К приоритетным задачам развития строительного материаловедения относится создание материалов с улучшенными физико-механическими характеристиками путем модификации их комплексными multifunctional добавками.

Из литературных источников [4] известно, что влияние хлоридсодержащих противоморозных добавок с двумя видами хлоридсодержащих компонентов (NaCl и CaCl_2) на реологические свойства цементной смеси при отрицательных температурах обеспечивает снижение предела текучести и увеличение вязкости. Кроме того, хлориды кальция и натрия способствуют снижению температуры замерзания цементного раствора и тем самым препятствуют замерзанию цементных масс. Одним из недостатков добавок хлоридных солей является то, что они отрицательно воздействуют на прочность бетона. Добавки нехлоридов, напротив, положительно влияют на прочностную характеристику.

Данные ускорители эффективно используются для улучшения гидратации цемента, сокращения срока схватывания, увеличения набора прочности цементной массы.

Однокомпонентные антифризы несколько отрицательно влияют на физические и механи-

ческие свойства материалов [4, 5]. Однокомпонентные антифризы в составе цемента не могут обеспечить необходимый уровень гидратации, принцип действия их заключается в понижении температуры замерзания воды, что дает возможность улучшить процесс гидратации цемента при минусовых температурах [6]. Для уменьшения (увеличения) отрицательного (положительного) действия одного из компонентов антифриза используют многокомпонентные добавки [6, 7]. Многокомпонентные добавки применяют в том случае, когда хотят или повысить общий основной эффект действия, или уменьшить отрицательные свойства одного из компонентов [4]. Образование в цементном материале многофазной структуры, содержащей CaCl_2 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и $\text{Mg}_2(\text{OH})_3\text{Cl}(\text{H}_2\text{O})_4$ приводит к тому, что бетон разрушается. Синергетическое действие хлоридных антифризов вызывает снижение прочностных характеристик до 50 %, снижение микротвердости до 60 % на глубине от 25 до 50 мм.

Известные разработки [4, 8] в области фазовой структуры цементных растворов дают возможность генерировать новые технологии в области строительных материалов, их возможного применения.

Особый интерес вызывают гидратационные процессы при отвердении цементных масс, включающих органические добавки солей натрия и кальция. В зимнем строительстве в качестве ускорителя отвердевания бетона используют $n\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaSO}_4$, где n может меняться от 1 до 3. Добавка сульфоалюмината кальция способствует высокой прочности и быстрому твердению бетонов. Кроме органических соединений солей натрия и кальция в качестве ускорителей твердения бетонов также используют фазу C-S-H (катионы Ca^{2+}). Катионы Ca^{2+} становятся центрами адсорбции молекул воды и за счет сближения межслойных дистанций (уменьшается межатомное расстояние O-Ca-O) происходит усадка цементного камня. Для портландцементных растворов наиболее эффективными являются добавки, содержащие органические соли натрия и кальция, катионы кальция – в качестве активных центров [8, 9].

Практическое подтверждение использования CH_3COONa как антиобледенителя и отвердителя описано в [8, 9]. Важно учитывать, что цементно-щебеночные смеси (CCSM) обладают значительной пористостью. Когда CCSM подвергаются воздействию отрицательных температур, увеличивается количество пор и капилляров, в которых при переходе воды в лед образуются напряжения, вызывающие разрушение материала.

Данная проблема может быть решена за счет многофункциональных противоморозных присадок, которые гарантируют уплотнение структуры и уменьшают пористость материала [10, 11, 12]. В качестве рекомендаций для этих целей можно использовать смеси нитратов, тиоцианатов, карбоновых кислот и органических солей. Синергизм достигается при комплексном использовании таких присадок [13, 14]. При отрицательных температурах положительно показывают себя наномодифицированные многокомпонентные добавки, обеспечивающие пластифицирующее, стабилизирующее, воздухововлекающее и противоморозное действие цементных растворов [15].

2. Материалы и методы

Учитывая отсутствие структурных исследований цементных паст с противоморозными добавками, целью данной работы является изучение влияния многофункциональных противоморозных композиций на формирование фазовой структуры цементного камня.

При разработке метода модификации отверждения цементных смесей при низких температурах мы учли положительный опыт и предыдущие результаты применения комплексных противоморозных добавок. Мы использовали многофункциональные антифризные компо-

зиции, включающие формиат кальция, хлорид кальция и суперпластификатор Полипласт СП-1 (в дальнейшем – суперпластификатор СП-1). Суперпластификатор СП-1 используется для уменьшения водопотребности цементной смеси. Кроме ускорения процесса твердения, хлорид кальция усиливает противоморозное действие формиата кальция, а его пониженное содержание в комплексной добавке должно предотвращать развитие разрушительных процессов при твердении цементно-минеральных материалов. Модификация цементно-щебеночных смесей разработанными добавками позволяет повысить прочность материала на сжатие в 3 раза, предел прочности на растяжение при раскалывании в 3.5 раза (ГОСТ 10180-2012¹), морозостойкость в 6.0 раз, трещиностойкость в 1.5 раза, модуль упругости в 2 раза по сравнению с немодифицированными составами (при температуре твердения $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Использование разработанных композиций противоморозных средств продлевает строительный сезон и улучшает эксплуатационные показатели материалов. Это также указывает на необходимость исследования совокупного положительного влияния противоморозных добавок, пластификаторов и ускорителей твердения в цементных пастах на формирование фазовой структуры и выявление взаимосвязи между структурой и свойствами полученных материалов.

Исследуемые материалы представляли собой цементные пасты без добавок и с добавками $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; CaCl_2 ; суперпластификатора СП-1. Образцы подвергались отверждению в течение 28 суток при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Использовался портландцемент марки СЕМ I 42.5Н, его минералогический и химический состав приведен на рис. 1, 2.

¹ ГОСТ 10180-2012. Межгосударственный стандарт. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам = Concretes. Methods for strength determination using reference specimens : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 декабря 2012 г. № 2071-ст : введен 2013-07-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200100908> (дата обращения: 25.12.2023).

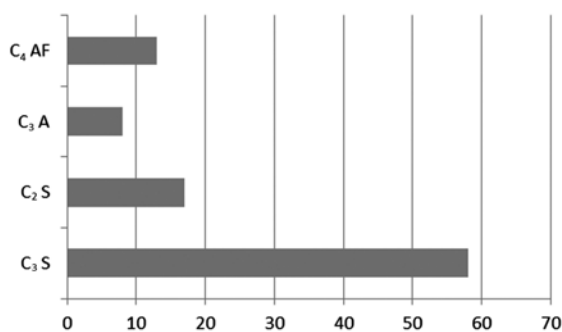


Рис. 1. Минералогический состав цемента, %
Fig. 1. Mineralogical composition of cement, %

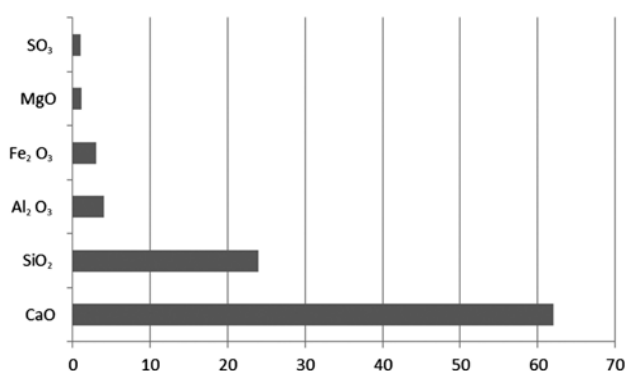


Рис. 2. Химический состав цемента, %
Fig. 2. Chemical composition of cement, %

Вещества, используемые в качестве антифризов, представлены в виде: формиата кальция (х. ч.) – кальциевая соль муравьиной кислоты ($(HCOO)_2Ca$); кристаллического хлорида кальция (х. ч.) ($CaCl_2$ (CC)). Суперпластификатор СП-1, смесь натриевых солей полиметиленафталинсульфокислот разной молекулярной массы, использовался как водоредуцирующая добавка. Суперпластификатор использовали в виде 3%-го водного раствора, pH 7–9 – вода для затворения, согласно ГОСТ 23732–2011². Образцы цементного камня после 28-дневного отверждения были испытаны на прочность при сжатии в соответ-

ствии с ГОСТ 10180-2012. Подготовленные образцы были исследованы с помощью рентгенофазового анализа. Дифракцию рентгеновских лучей образцов исследовали с помощью дифрактометра ДРОН-3 с медным излучением (длина волны 1.54178 Å, шаг 0.05°). Кристаллическая фаза идентифицировалась соответственно характерным отражениям с определенными межплоскостными расстояниями (d) и относительными интенсивностями (I) на дифрактограммах. Относительное содержание аморфного и кристаллического компонентов рассчитывали с помощью интерактивной компьютерной программы X-ray tool (Россия) методом внешнего стандарта (использовали корунд). Методики стандартные. Степень гидратации цементных паст определяли двумя независимыми методами (используя соотношение интенсивностей отражений негидратированных компонентов цемента и отражений гидратированных новообразований).

Эксперимент. Фазовый состав цементных паст, затвердевающих при отрицательных температурах, определяли с помощью рентгенофазового анализа. Цементные образцы, отвержденные в течение 28 дней, были испытаны на прочность при сжатии (таблица 1).

Изученные образцы по составу кристаллической фазы обладают схожестью, в составе преобладает C_3S (негидратированный). $3CaO \cdot Al_2O_3$ (C_3A); $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ (C_4AF) в количественном соотношении остаются на прежнем уровне (C_3A и C_4AF – 5–15 %). Алюминат и алюмоферрит кальция подверглись гидратации в меньшей степени.

Новые гидратационные образования в цементных пастах представлены портландитом $Ca(OH)_2$ и гидросиликатом дикальция ($Ca_2SiO_4 \cdot nH_2O$). Наряду с кристаллическими фазами также содержится аморфный компонент,

² ГОСТ 23732–2011. Межгосударственный стандарт. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия = Water for concrete and mortars. Specifications : утвержден Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 мая 2012 г. № 97-ст : введен в действие в качестве национального стандарта Российской Федерации 2012-10-01. – Текст : электронный // Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов : сайт. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200093835> (дата обращения: 25.12.2023).

Таблица 1 / Table 1

Прочность на сжатие образцов, отвержденных при -20°C
Compressive strength of samples hardened at -20°

Содержание добавок в цементных пастах, % от массы цемента			Водоцементное отношение, В/Ц	Прочность на сжатие, МПа
$(\text{HCOO})_2\text{Ca}$	CaCl_2	СП-1		
–	–	–	0.25	5.0
6	–	–	0.21	18.7
–	3	–	0.25	26.7
6	3	2	0.19	44.8
–	3	2	0.20	34.5
6	–	2	0.19	28.5
6	3	–	0.20	23.8

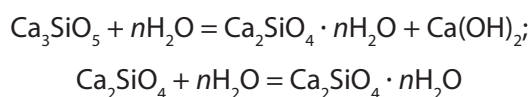
Таблица 2 / Table 2

Относительное содержание фаз и степень гидратации алита и белита в цементных образцах
Relative phase content and degree of hydration of alite and belite in cement samples

№	Состав образцов	Относительное содержание фаз, %		
		Кристалли- ческая	Аморфная	Степень гидратации
1	Цементная масса без добавок	49.0	51.0	45
2	Цементная масса с 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$	54.0	46.0	53
3	Цементная масса с 3 % CaCl_2	60.0	40.0	60
4	Цементная паста с 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; 3 % CaCl_2 ; 2 % СП-1	63.0	37.0	70
5	Цементная масса с 3 % CaCl_2 ; 2 % СП-1	62.0	38.0	59
6	Цементная масса с 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; 2 % СП-1	65.0	35.0	35
7	Цементная масса с 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; 3 % CaCl_2	61.4	38.6	51

который состоит из новых гидратных образований коллоидного размера с вероятным составом $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (таблица 2). Анализ рентгенограмм без добавок показывает, что в портландцементе наиболее гидратированными были алит и белит, в то время как алюминаты кальция и алюмоферриты были гидратированы в значительно меньшей степени.

Схема гидратационного превращения, имевшего место в цементных пастах, может быть описана двумя основными реакциями:



Образование $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ приводит к аморфности компонента в цементных пастах (таблица 2). Основная часть новообразований –

это коллоидные растворы (процесс гидратации портландцемента фиксируется на начальной стадии). Лишь небольшая часть коллоида кристаллизуется в портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ($d = 4.921$; $2.632 \text{ \AA}$) и гидросиликат кальция $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (число молекул воды в его структуре составляет от 3 до 4, и он относится к группе высокоосновных гидросиликатов C-S-H (II), что соответствует дифракционным отражениям $d = 10.5$; $9.69 \text{ \AA}$) (рис. 3).

3. Результаты и обсуждение

Таким образом, цементные пасты с добавлением 6%-го формиата кальция демонстрируют более высокую степень гидратации. Это приводит к большей кристаллизации аморфного компонента в портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. Различное содержание молекул воды обуслав-

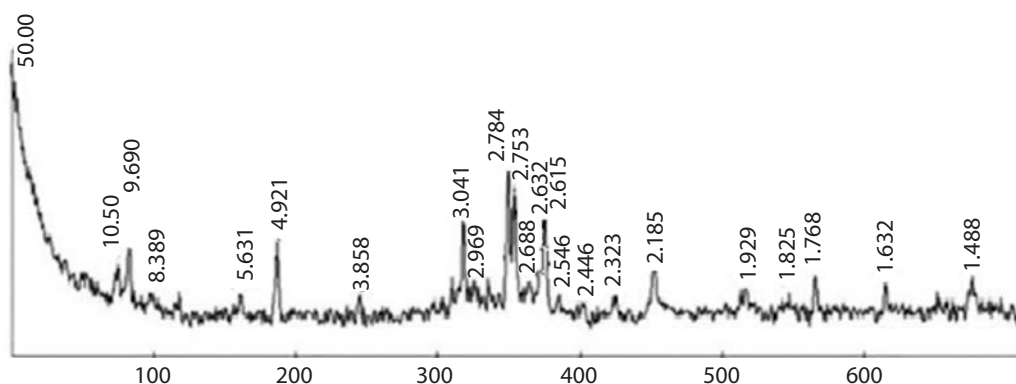


Рис. 3. Рентгенограмма образца цементной пасты, содержащего 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; 3 % CaCl_2 ; 2 % СП-1
Fig. 3. X-ray radiograph of a cement paste sample containing 6 % $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; 3 % CaCl_2 ; 2 % SP-1

ливают две модификации $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (отражение $d = 10.5 \text{ \AA}$ и $d = 9.69 \text{ \AA}$). Более глубокий процесс гидратации объясняется тем фактом, что добавление формиата в условиях образования цементного теста при температуре -20°C оказывает многофункциональное воздействие на гидратацию портландцемента. Формиат кальция помогает снизить температуру замерзания воды, что обеспечивает гидратацию в цементной массе при отрицательных температурах. Добавка антифриза увеличивает степень гидролиза в цементной массе, следовательно, увеличивается скорость гидратации клинкера, что приводит к увеличению прочности портландцемента.

Показано, что добавка CaCl_2 , являясь ускорителем процесса твердения, в большей степени способствует гидратационному превращению двух- и трехкальциевых силикатов. Он работает как добавка формиата кальция, снижает температуру замерзания воды, тем самым увеличивая время гидратации портландцемента. Следует отметить, что на этой стадии хлорид не образует самостоятельных фаз, поскольку концентрация ионов хлора в растворе явно недостаточна для образования самостоятельных соединений. В рассмотренных вариантах модификации цементных паст суперпластификатором была отмечена более низкая степень гидратации, чем та, которая получена при совместном добавлении формиата кальция и хлорида кальция. Отсутствие в них значительного количества аморфной фазы, вероятно, объясняется более низким водоцементным соотношением (В/Ц) по сравнению с цементными

пастами без добавок. Можно сделать вывод, что добавка суперпластификатора не является стимулятором гидратационного превращения портландцемента при отрицательных температурах. Его эффективное воздействие объясняется снижением водоцементного отношения, что снижает разрушающее действие жидкой фазы.

Комплексная добавка $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$, CaCl_2 и суперпластификатора СП-1 увеличивает степень гидратации силикатных компонентов цемента. Рентгенофазовый анализ показал высокую интенсивность отражений гидросиликата кальция ($d = 9.69 \text{ \AA}$), портландита ($d = 4.921 \text{ \AA}$, $d = 2.632 \text{ \AA}$) и уменьшение интенсивности отражений алита ($d = 3.041 \text{ \AA}$ и белита $d = 2.778 \text{ \AA}$). Коллегиальное применение в цементных растворах $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$ и CaCl_2 способствует активации процессов гидратации портландцемента, а добавление суперпластификатора СП-1 приводит к снижению соотношения В/Ц, что приводит к ускорению процесса твердения и достижению максимальной прочности цементной массы при отрицательных температурах. Следует отметить, что каждая комплексная добавка максимально проявляет свою активность в процессах гидратации. Это подтверждается прочностными характеристиками цементных паст.

Модификация CCSM комплексными добавками позволяет улучшить технические показатели строительных материалов. Использование противоморозных и ускоряющих добавок в технологиях цементобетонных растворов, используемых при отрицательных температурах (до -20°C), продлевает сезон строительства и улучшает эксплуа-

тационные показатели материалов. Состав добавок определяется в зависимости от температуры твердения для обеспечения заданного уровня долговечности и эксплуатационных показателей.

4. Заключение

1. Подтверждено, что комплекс добавок, введенных в состав цементных паст, значительно улучшает механические и реологические свойства цементных композиций.
2. Определены фазовые составы цементной массы в соотношении аморфной/кристаллической фаз (таблица 2). Портландит и гидросиликат дикальция, образующие структуру гидратированных новообразований, по всей вероятности, представляют собой коллоидные растворы состава $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (C-S-H), которые обладают преимущественно рентгеноаморфной структурой и имеют неопределенный состав.
3. Отмечено, что комплексные добавки антифризов, такие как $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$, CaCl_2 , СП-1,

обеспечивают высокую степень гидратации алита и белита, что приводит к усилению кристаллизации аморфной фазы и обуславливает образование портландита.

4. Подтверждено, что прочность цементных паст на сжатие повышается до 44.8 МПа с увеличением степени гидратации цемента (до 70 %), что обеспечивает длительное твердение цементных паст и возможность использования их при низких температурах. Совместное использование компонентов $(\text{HCOO})_2\text{Ca}$; CaCl_2 ; СП-1 обеспечивает синергизм процессов структурообразования.

Таким образом, портландцемент, подвергаясь гидратации, образует структуру коллоидного гидрогеля с переменным составом, что затрудняет формирование цементного камня.

Исследования в области гидравлической активности клинкера, структуры образующегося геля, физико-химических свойств цементного камня требуют дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Исследование влияния формиата кальция на процесс гидратации цемента с учетом фазового состава и температурного режима твердения / А. О. Адамцевич, А. П. Пустовгар, А. В. Еремин, С. А. Пашкевич. – Текст : непосредственный // Строительные материалы. – 2013. – № 7. – С. 59–61.
2. Лотов, В. А. Изменение фазового состава системы цемент-вода при гидратации и твердении / В. А. Лотов. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321, № 3. – С. 42–45.
3. Galkin, Yu. Yu. The phase composition and properties of aluminat cements after early loading / Yu. Yu. Galkin, S. A. Udodov, L. V. Vasil'eva. – DOI 10.18720/Mce.75.11. – Текст : непосредственный // Magazine Of Civil Engineering. – 2017. – No. 7(75). – P. 114–122.
4. Васильев, А. С. Эффективность добавок – ускорителей схватывания и твердения для торкрет-бетона / А. С. Васильев, Ю. Г. Барабанщиков. – Текст : непосредственный // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 8 (34). – С. 72–78.
5. Исследование влияния формиата натрия на термостойкость крахмалсодержащего глинистого бурового раствора / Г. В. Конесев, Р. Р. Ахаев, Т. Д. Дихтярь [и др.]. – DOI 10.18799/24131830/2020/8/2773. – Текст : непосредственный // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331, № 8. – С. 112–122.
6. Барабанщиков, Ю. Г. Суперпластификатор С-3 и его влияние на технологические свойства бетонных смесей / Ю. Г. Барабанщиков, М. В. Комаринский. – Текст : непосредственный // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2014. – № 6 (21). – С. 58–69.
7. Barabanshchikov, Y. G. Influence of superplasticizer S-3 on the technological properties of concrete mixtures / Y. G. Barabanshchikov, M. V. Komarinskiy. – DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.780. – Текст : непосредственный // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 941-944. – P. 780–785.
8. Рахимбаев, Ш. М. Обоснование выбора типа вяжущего для агрессивных сред органического происхождения на основе теории гетерогенных физико-химических процессов / Ш. М. Рахимбаев, Н. М. Толыпина. –

Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2016. – № 9. – С. 159–163.

9. Тимохин, Д. К. Структурообразование цементного камня, модифицированного гидроксилсодержащими добавками углеводов / Д. К. Тимохин, Н. А. Козлов. – Текст : непосредственный // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2010. – № 19 (38). – С. 69–75.
10. Лукутцова, Н. П. Исследование мелкозернистого бетона, модифицированного наноструктурной добавкой / Н. П. Лукутцова, Е. Г. Матвеева, Д. Е. Фокин. – Текст : непосредственный // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2010. – № 4. – С. 6–11.
11. Шишканова, В. Н. Особенности структуры мелкозернистого бетона и его преимущества / В. Н. Шишканова, М. Н. Путилова. – Текст : непосредственный // Наука и образование: новое время. Научно-методический журнал. – 2018. – № 3 (10). – С. 14–16.
12. Киянец, А. В. Влияние электролитов на твердение бетонов с магнезиальным оксихлоридным цементом при отрицательных температурах / А. В. Киянец. – DOI 10.14529/build190304. – Текст : непосредственный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2019. – Т. 19, № 3. – С. 24–28.
13. Bentz, D. P. Modelling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity / D. P. Bentz, E. J. Garboczi. – DOI 10.1007/bf02472448. – Текст : непосредственный // Materials and Structures. – 1992. – Vol. 25, No. 9. – P. 523–533.
14. Duong, V. B. Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials / V. B. Duong, R. Sahamitmongkol, S. Tangtermsirikul. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.042. – Текст : непосредственный // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 40. – P. 1066–1075.
15. Chung, D. Review: Improving cement-based materials by using silica fume / D. Chung. – DOI 10.1023/A:1013889725971. – Текст : непосредственный // Journal of Materials Science. – 2002. – Vol. 37, No. 4. – P. 673–682.

References

1. Adamtsevich, A. O., Pustovgar, A. P., Eremin, A. V., & Pashkevich, S. A. (2013). Issledovanie vliyaniya formiata kal'tsiya na protsess gidratatsii tsementa s uchetom fazovogo sostava i temperaturnogo rezhima tverdeniya. Stroitel'nye Materialy (Construction Materials), (7), pp. 59-61. (In Russian).
2. Lotov, V. A. (2012). Izmenenie fazovogo sostava sistemy tsement-voda pri gidratatsii i tverdenii. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 321(3), pp. 42-45. (In Russian).
3. Galkin, Yu. Yu., Udodov, S. A., & Vasil'eva, L. V. (2017). The phase composition and properties of aluminate cements after early loading. Magazine of Civil Engineering, (7(75)), pp. 114-122. (In English).
4. Vasiliev, A. S., & Barabanshchikov, Yu. G. (2012). The effectiveness of setting and hardening accelerators for sprayed concrete. Engineering and Construction Journal, 8(34), pp. 72-78. (In Russian).
5. Konesev, G. V., Akhaev, R. R., Dikhtyar, T. D., Mamaeva, O. G., & Vyaznikovtsev, S. F. (2020). Research of the sodium formate influence on thermostability of starch-containing clay drilling mud. Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering, 331(8), pp. 112-122. (In Russian).
6. Barabanshchikov, Yu. G., & Komarinskiy, M. V. (2014). Superplasticized technological properties of concrete mixtures. Construction of Unique Buildings And Structures, (6(21)), pp. 58-69. (In Russian).
7. Barabanshchikov, Y. G., & Komarinskiy, M. V. (2014). Influence of superplasticizer S-3 on the technological properties of mixture concretes. Advanced Materials Research, 941-944, pp. 780-785. (In English).
8. Rakhimbaev, Sh. M., & Tolypina, N. M. (2016). Reasons for the choice of type of the organic origin knitting for hostile environment on the basis of the theory of heterogeneous physical and chemical processes. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov, 1(9), pp. 159-163. (In Russian).
9. Timokhin, D. K., & Kozlov, N. A. (2010). Structurization of cement stone modify hydroxyl containing admixture of carbohydrates. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturo-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura, (19(38)), pp. 69-75. (In Russian).
10. Lukutsova, N. P., Matveeva, E. G., & Fokin, D. E. (2010). Issledovanie melkozernistogo betona, modifitsirovannogo nanostrukturnoy dobavkoy. Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov, (4), pp. 6-11. (In Russian).
11. Shishkanova, V. N., & Putilova, M. N. (2018). Peculiarities of the structure of small-concrete concrete and its advantages. Science and Education: New Time. Scientific and Methodological Journal, (3(10)), pp. 14-16. (In Russian).

12. Kiyanets, A.V. (2019). Influence of electrolytes on hardening of concrete with oxychloride magnesia cement at low temperatures. *Bulletin of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture*, 19(3), pp. 24-28. (In Russian). DOI 10.14529/build190304.
13. Bentz, D. P., Garboczi, E. J. (1992). Modeling the leaching of calcium hydroxide from cement paste: effects on pore space percolation and diffusivity. *Materials and Structures*, 25(9), pp. 523-533. (In English). DOI 10.1007/bf02472448.
14. Duong, V. B., Sahamitmongkol, R., & Tangtermsirikul, S. (2013). Effect of leaching on carbonation resistance and steel corrosion of cement-based materials. *Construction and Building Materials*, 40, pp. 1066-1075. (In English). DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.042.
15. Chung, D. (2002). Review: Improving cement-based materials by using silica fume. *Journal of Materials Science*, 37(4), pp. 673-682. (In English).

Сведения об авторах

Макарова Людмила Николаевна, старший преподаватель кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, e-mail: danchukln@yandex.ru

Шмидт Вадим Владимирович, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, преподаватель кафедры войскового строительства, Тюменское высшее военно-инженерное командное училище имени маршала инженерных войск А. И. Прошлякова, e-mail: shmidt_vadim@mail.ru. ORCID 0009-0005-8401-9722

Исмагилова Алена Васильевна, канд. хим. наук, доцент кафедры общей и физической химии, Тюменский индустриальный университет, e-mail: ismagilovaav@tyuiu.ru

Макаров Вячеслав Вячеславович, обучающийся кафедры материаловедения и технологии конструкционных материалов, Тюменский индустриальный университет, e-mail: makarovvv21@yandex.ru

Information about the authors

Lyudmila N. Makarova, Senior Lecturer at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, e-mail: danchukln@yandex.ru

Vadim V. Schmidt, Cand. Sc. in Chemistry, Associate Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, Lecturer at the Department of Military Construction, Tyumen Higher Military Engineer Command School named after A. I. Proshlyakov, e-mail: shmidt_vadim@mail.ru. ORCID 0009-0005-8401-9722

Alena V. Ismagilova, Cand. Sc. in Chemistry, Associate Professor at the Department of General and Physical Chemistry, Industrial University of Tyumen, e-mail: ismagilovaav@tyuiu.ru

Vyacheslav V. Makarov, Student at the Department of Materials Science and Technology of Structural Materials, Industrial University of Tyumen, e-mail: makarovvv21@yandex.ru