2025; 17 (3): 254–272



ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ

Обзорная статья / Review article УДК 666.9-121, 66-963 https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-254-272

CC BY 4.0

Комплексный механотермический синтез наноструктурированных гидросиликатов кальция для цементных композитов

Евгений Александрович Шошин* (b), Денис Константинович Тимохин (b), Александр Владимирович Страхов (b), Мария Петровна Кочергина (b), Георгий Андреевич Корольков (b)

Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, Саратов, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: shoshin234@mail.ru

аннотация

Введение. Применение наноразмерных гидросиликатов кальция в качестве добавок, ускоряющих структурообразование цементных композиций, становится все более популярным. Причина этого кроется в их высокой эффективности как ускорителей при отсутствии негативного влияния на долговременную прочность и долговечность цементных композитов. Дополнительным преимуществом наногидросиликатов кальция является разнообразие существующих методов их синтеза, среди которых механохимический метод выделяется доступностью сырьевой базы и простотой технического оформления синтеза. Основная часть. В обзоре рассматривается новый метод синтеза наноструктурированных гидросиликатов кальция – комплексный механотермический синтез, представляющий собой сочетание механохимического синтеза модифицированных углеводом гидросиликатов кальция с последующим их термическим разложением. Модифицированные гидросиликаты кальция, в межслоевое пространство которых интеркалирован углевод, способны разрушаться в условиях низкотемпературного термолиза (<150 °C) с образованием наночастиц гидросиликатов, коагуляция которых приводит к образованию наноструктурированной фазы гидросиликатов кальция – ксерогеля. Смесь ксерогеля с остатками сырьевых материалов, не разложившимися при термолизе гидратными фазами, представляет собой силикат-кальциевую дисперсию (СКД). Описаны технологические особенности синтеза СКД и некоторые свойства СКД. В частности, выявлено умеренное (до 60%) ускорение набора суточной прочности модифицированных СКД цементных растворов с параллельным приростом марочной прочности (17%). Отмечается значительное влияние СКД на реологические свойства цементных смесей. Заключение. Комплексный механотермический синтез является новым синтетическим направлением получения наноразмерных гидросиликатов кальция. Развитие этого направления далеко от завершения и тесно связано с развитием теоретической базы, в частности, концепции неклассической нуклеации применительно к гидросиликатным фазам. Развитие метода может быть направлено на поиск новых органических модификаторов с получением новых свойств модифицированных гидросиликатов и продуктов их термического распада, на совершенствование режимов синтеза с целью регулирования количественных и качественных параметров наноструктурированной фазы, потребительских свойств СКД, расширение сфер ее применения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидросиликаты кальция, наноструктура, комплексный механотермический синтез

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Шошин Е.А., Тимохин Д.К., Страхов А.В., Кочергина М.П., Корольков Г.А. Комплексный механотермический синтез наноструктурированных гидросиликатов кальция для цементных композитов. *Нанотехнологии в строительстве*. 2025;17(3):254–272. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-254-272. – EDN: AJUNAK.

[©] Шошин Е.А., Тимохин Д.Е., Кочергина М.П., Корольков Г.А., 2025



Complex mechanical-thermal synthesis of nanostructured calcium hydrosilicates for cement composites

Evgeny A. Shoshin* (D), Denis K. Timokhin (D), Alexander V. Strakhov (D), Maria P. Kochergina (D), Georgy A. Korolkov (D)

Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

* Corresponding author: e-mail: shoshin234@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The use of nanosized calcium hydrosilicates as additives accelerating the structure formation of cement compositions is becoming increasingly popular. The reason for this lies in their high efficiency as accelerators in the absence of a negative effect on the long-term strength and durability of cement composites. An additional advantage of nanoscale calcium hydrosilicates is the variety of existing methods for their synthesis, among which the mechanochemical method stands out due to the availability of raw materials and the simplicity of the technical design of the synthesis. Article body. The review considers a new method for the synthesis of nanostructured calcium hydrosilicates - complex mechanical-thermal synthesis, which is a combination of mechanochemical synthesis of carbohydrate-modified calcium hydrosilicates with their subsequent thermal decomposition. Modified calcium hydrosilicates, in the interlayer space of which the carbohydrate is intercalated, are capable of decomposition under conditions of low-temperature thermolysis (<150 °C) with the formation of hydrosilicate nanoparticles, the coagulation of which leads to the formation of a nanostructured phase of calcium hydrosilicates – xerogel. A mixture of xerogel with residues of raw materials, hydrated phases that have not decomposed during thermolysis is a calcium silicate dispersion (CSD). The technological features of CSD synthesis and some properties of CSD are described. In particular, a moderate (up to 60%) acceleration of daily strength gain of CSD-modified cement mortars with a parallel increase in grade strength (17%) is revealed. A significant effect of CSD on the rheological properties of cement mixtures is noted. Conclusion. Complex mechanical-thermal synthesis is a new synthetic direction for obtaining nanosized calcium hydrosilicates. The development of this direction is far from complete and is closely related to the development of the theoretical base, in particular, the concept of non-classical nucleation as applied to hydrosilicate phases. The development of the method can be aimed at searching for new organic modifiers with the acquisition of new properties of modified hydrosilicates and products of their thermal decomposition, at improving synthesis modes in order to regulate the quantitative and qualitative parameters of the nanostructured phase, consumer properties of the CSD, and expanding the scope of its application.

KEYWORDS: calcium hydrosilicates, nanostructure, complex mechanical-thermal synthesis

FOR CITATION:

Shoshin E.A., Timokhin D.K., Strakhov A.V., Kochergina M.P., Korolkov G.A. Complex mechanical-thermal synthesis of nanostructured calcium hydrosilicates for cement composites. *Nanotechnologies in Construction*. 2025;17(3):254–272. https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-3-254-272. – EDN: AJUNAK.

1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях повышения требований к ускоряющим добавкам (вяжущим с высокой степенью замещения цемента, 3D-печати и др.) эффективность традиционных ускорителей оказывается недостаточной [1], поэтому поиск эффективных методов ускорения гидратации цемента остается актуальной темой [2–4], а применение наноматериалов – новым трендом [5–7]. Традиционные добавки-ускорители (нитриты, нитраты, тиоцианаты и др. [8, 9]), органические вещества (формиаты, алканоламины [10–11]) и их смесей [12–13]) обладают целым букетом побочных эффектов, среди которых выделяются негативные изменения фазового состава камня, прочностных характеристик камня, долговечности [1]. На этом фоне наноразмерные гидросиликаты

кальция кажутся своеобразной «панацеей»: не обладая побочными эффектами, они демонстрируют высокое сродство цементному гелю в сочетании с приемлемой стоимостью [14]. Применение наногидросиликатов - относительно новое направление, поэтому существует широкий круг вопросов, требующих разрешения (например, влияние Са/ Si-отношения затравки и ее кристалличности на характеристики образующегося камня). В зарубежной литературе наногиросиликаты рассматриваются преимущественно как ускоряющие агенты [15], хотя они обладают и реологической активностью [16, 17]. Примечательно, что выход на рынок товарного ускорителя на основе наногидросиликатов кальция (суспензия Basf Master X-Seed 100) не снижает дискуссионности темы факторов эффективности наногидросиликатных ускорителей, так как в число фак-



торов эффективности наногидросиликатов, помимо ожидаемых концентрации наночастиц, их размера, морфологии и Ca/Si-отношения, минерального состава вяжущего, включается, согласно [14], также и способ получения наноматериала. Последнее само по себе наглядно демонстрирует отсутствие ясности в вопросе механизмов влияния наногидросиликатов на цементную систему.

2. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО МЕТОДА ПОЛУЧЕНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ ГИДРОСИЛИКАТОВ КАЛЬЦИЯ

Прямое химическое взаимодействие SiO₂ и CaO может быть осуществлено как при обычных условиях, так и при повышенных температурах и давлении в рамках, например, механохимического синтеза. В обычных условиях параметры реакции будут определяться растворимостью компонентов системы в воде, и низкая растворимость SiO, определяет значительную длительность процесса (до месяца [16]). Механохимический синтез позволяет ускорить пуццолановую реакцию, сократив длительность синтеза до нескольких часов или дней [16]. В основе ускоряющего эффекта лежит механоактивация – эффективный способ увеличения активности минерального сырья [17-20]. Механохимический синтез проводится в форме «мокрого» помола, где жидкая фаза обеспечивает лучшую гранулометрию продуктов помола [21] и способствует формированию нанофаз [22, 23]. Параллельно увеличивается растворимость минерального сырья [24], что позволяет снизить водо-твердое отношение. Последнее дает более широкие возможности управления Ca/Si-отношением синтезируемых гидросиликатов. Пожалуй, наиболее значимое преимущество механохимического синтеза в том, что Ca/Si-отношение исходной сырьевой смеси определяет Ca/Si-отношение получаемых гидросиликатов [14, 25], кроме того, метод ориентирован на применение доступного сырья и разнообразного помольного оборудования [26, 27]. В то же время, с позиций применения в строительстве, «отходы» механохимического синтеза в виде непрореагировавших зерен сырьевых материалов могут выступать полезным компонентом сырьевой строительной смеси, где принцип полимодальности зерновой смеси является определяющим - и это еще одно неочевидное преимуществом механохимического синтеза. Однако длительность механохимического синтеза остается наиболее «невыгодной» стороной этого процесса. Но решение проблемы длительности синтеза может быть найдено в комплексном подходе к синтезу наночастиц гидросиликатов.

3. КОМПЛЕКСНЫЙ МЕХАНОТЕРМИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ

Выше отмечалось, что механохимический синтез проводится в форме «мокрого» помола, предполагающего определенную последовательность гетерофазных процессов фазообразования. Как раз гетерофазные процессы являются темой актуальных научных изысканий, результаты которых могут иметь в отношении цементных систем многообещающее продолжение как в теоретическом, так и практическом плане. Знакомство с ними позволит лучше понять особенности и перспективы комплексного механотермического синтеза (КМТ-синтеза).

3.1. Формирование С—S—H-фазы с позиции неклассической нуклеации

Сложность структуры C-S-H-фаз и неопределенность механизмов их формирования являются причиной регулярного появления все новых работ, посвященных этой теме (например, одна из последних – [28]).

Неупорядоченная слоистая структура гелевых фаз (C–S–H-фазы) определяется системой мостиковых межслойных ионов кальция. Это рассматривается как основной фактор, определяющий сложность трехмерной структуры C–S–H-фаз [29] и не имеющий объяснения в рамках традиционной модели формирования твердой фазы [30], предполагающей образование и рост критических зародышей новой фазы [31].

Согласно новой концепции фазообразования – неклассической нуклеации – образование новой фазы начинается с образования «докритических кластеров» («псевдофаз», предшественников зародышей), которые превращаются в кластеры критических размеров и растут с образованием конечной фазы. Эволюция докритических кластеров новой фазы определяется процессами агрегации, диффузии и конвекции [32]. Отличительными элементами концепции неклассической нуклеации являются, во-первых, отсутствие тождества морфологии предшественника зародышей новой фазы и кристалла конечной фазы [33-35], а во-вторых, высокая чувствительность «предшественников» к присутствию в растворе органических веществ, присутствие которых может изменить время индукции, стабильность «предшественника», изменить размер и форму кристаллов [36, 37].

Формирование С–S–H-фаз с позиций концепции неклассической нуклеации представляет собой образование наноразмерных глобул (капель, «предшественников») аморфных гидросиликатов кальция, формирующих затем фрактальные структуры (рис. 1) [31]. Через 15 мин в капле наноагрегата формируется



ядро, а на поверхности капли появляются нанопленки, количество которых растет по мере «растворения» капель (рис. 2). В течение часа капли гидросиликатов трансформируются в хорошо знакомые пленки C–S–H-фазы.

Процесс преобразования капель в нанопленки имеет определенный калориметрический портрет последовательность эндо- и экзотермических эффектов, соответствующих образованию капель и их трансформации [31]. Присутствие поликарбоксилатного пластификатора способствует стабилизации капель гидросиликатов: их трансформация в нанопленки замедляется, а начало процесса трансформации смещается в сторону бо́льших времен. Траектория трансформации капли не изменилась, но увеличилось содержание кальция в капле, а сами капли гидросиликатов образовали более рыхлые агрегаты.



Т.е. доказано влияние на процесс эволюции капель органических агентов. И хотя данный взгляд на процессы формирования С–S–H-фаз пока дискутируется, ясно, что стереохимия органических добавок имеет важное значение для эволюции силикатной системы. При этом стереохимия органической молекулы должна соответствовать стереохимии как водного раствора, так и минеральной фазы. И углеводы в этом плане полностью отвечают этому требованию, что более подробно будет рассмотрено ниже.

3.2. Влияние добавок углеводов на фазообразование Ca(OH),

Авторы [38] описали способность сахарозы кардинально менять морфологию кристаллов Ca(OH)₂. Причин этому может быть несколько: будучи слабой



Рис. 1. Микроэлектронные изображения C–S–H, осажденного из растворов Ca(NO₃)₂ и Na₂SiO₃ (5 мин): а – фрактальная структура из капель (×30 000 крат); б – отдельная капля гидросиликатов кальция [31]



Рис. 2. Микроэлектронные изображения C-S-H, осажденного из растворов $Ca(NO_3)_2$ и Na_2SiO_3 через: a – 15; б – 45; в – 60 минут [31]



многоосновной кислотой [39], сахароза может диссоциировать до четвертой ступени в зависимости от pH среды. Ca(OH)₂ также способен к ступенчатой диссоциации и с ростом pH доля ионов Ca(OH)⁺ увеличивается [40]. В этих условиях сахароза способна образовывать ряд кальциевых комплексов с соотношением Ca:Sucr = 1:4 (где Sucr – сахароза) при pH > 12, до Ca:Sucr =1:1 при pH <11 [41, 42]. Изменчивость свойств сахарозы в зависимости от pH раствора определяет ее высокую адсорбционную активность, а также высокие уровни пересыщения раствора по Ca²⁺. Все вместе способно кардинально изменить кинетику зародышеобразования и повлиять на число образующихся кристаллов и их размеры.

С другой стороны, стереохимия углеводов позволяет им эффективно замещать отдельные молекулы воды в системе водородных связей водного раствора [43-45], что не может не изменить условия формирования зародышей по неклассической схеме. Последнее было доказано в работе [46], авторы которой выявили цепочку превращений: предъядерные кластеры – плотные жидкие предшественники (стадия преднуклеации) – аморфный Са(ОН), – метастабильный нанокристаллический Са(ОН),. Углеводы, исследованные в работе, не нарушают последовательности превращений, но активно влияют на этап преднуклеации, замедляя эволюцию предшественников твердой фазы Ca(OH),. В итоге сохраняются высокие уровни пересыщения раствора при замедлении формирования аморфного Ca(OH)₂. Авторы [47] отмечают обратную зависимость между уровнем пересыщения раствора в начале зародышеобразования и конечными морфологическими характеристиками Ca(OH)₂, что не соответствует представлениям классической теории кристаллизации. Кроме того, присутствующие при нуклеации добавки способны влиять не только на морфологию, но и на свойства образующегося Са(ОН), (например, на способность к карбонизации) [38, 48]. Важность факта способности Са(ОН), к эволюции по схеме неклассической нуклеации особенно возрастает с учетом того, что, согласно dreierkette-модели Тейлора (сформулирована в 1986 году, но до сих пор актуальна), формирование С-Ѕ-Н-фазы начинается с образования пластинки Ca(OH), на поверхности которой «адсорбируются» мономерные или олигомерные кремнекислородные тетраэдры. Следовательно, морфология и свойства «первичных» частиц Ca(OH), может определять морфологию и свойства образующихся впоследствии силикатов.

3.3. Предпосылки эффективности сочетания методов механохимического синтеза и термолиза в технологии высокодисперсных силикатных систем

Яркой иллюстрацией важности стереохимического фактора являются результаты работ авторов [49, 50], где показаны принципиальные различия в адсорбции моно- и дисахаридов на поверхностях цементного клинкера и гидросиликатов. Сахароза, как дисахарид, благодаря пространственному строению своей устойчивой в щелочной среде молекулы образует адсорбционный комплекс на поверхности алита с участием трех ОН-групп, тогда как глюкоза адсорбируется только по карбонильной группе в открытой форме [49] (рис. 3). В результате поверхность силиката блокируется: согласно [49], скорость ги-



Рис. 3. Схема расположения адсорбированных молекул углеводов на поверхности алюмината кальция: а – глюкозы, б – сахарозы [49]



дратации алита в присутствии сахарозы снижается на 90%. Одновременно с этим продукты гидратации отличаются большей дисперсностью и дефектностью формы. Механическое блокирование поверхности, согласно [49], является причиной замедляющего эффекта сахарозы. Но, с точки зрения обсуждаемой в этой работе темы, более важно то, что блокирование поверхности силиката может быть преодолено помолом. При этом сами углеводы встраиваются в структуру гидратных фаз, меняя величины межслоевого расстояния пропорционально собственной совместимости с трехмерной сеткой водородных связей воды [51] (рис. 4).

Последнее подтверждает участие углеводов в формировании модифицированных гидратных фаз предположительно на стадии формирования капель, когда нанокластеры новой фазы агрегируются в водном растворе, где фрагменты сетки водородных связей воды замещены молекулами углеводов. А с другой стороны, присутствие углевода в структуре модифицированной гидратной фазы может повлиять на ее свойства, в частности, на отношение модифицированных гидратных фаз к нагреванию и обезвоживанию.

Все эти соображения и легли в основу комплексного механо-термического синтеза, который представляет собой двухэтапный процесс: первый этап заключается в помоле минерального сырья в растворе углевода с образованием модифицированных сахарозой гидросиликатов кальция (МГС), второй этап – термическая обработка продуктов механохимического синтеза, в результате чего наблюдается фрагментация частиц МГС (самодиспергирование) с образованием полимодального силикатного порошка - силикат-кальциевой дисперсии (СКД) [52]. Полимодальность обеспечивается присутствием непрореагировавших сырьевых минеральных частиц (микрометрическая фракция) и субмикрометрических частиц ксерогеля – рыхлого коагулюма слабосвязанных между собой наночастиц гидросиликатов кальция (рис. 5а). Наличие частиц ксерогеля определяет сравнительно высокий уровень удельной поверхности порошков (по БЭТ): например, 1,5-часовой механохимический



Лактоза/0,35 нм / наименее совместима

Мальтоза / 0,43 нм / умеренно совместима

Сахароза / 0,45 нм / максимально совместима

Рис. 4. Изменение межплоскостного расстояния гидратных фаз, модифицированных разными углеводами (SAED-анализ, волновое число 2 нм⁻¹): углевод / межплоскостное расстояние модифицированных гидратных фаз / совместимость углеводов с трехмерной сеткой водородных связей воды [51]









Рис. 5. Морфология СКД (а) и кривые распределения частиц СКД по размерам (б), модифицирующий углевод сахароза. Длительность механохимического синтеза 1,5 часа [53]

синтез МГС с последующей термической обработкой полученных продуктов позволяет получить порошок с удельной поверхностью $26,3 \pm 0,7 \text{ м}^2/\text{г}$ при содержании нанофазы 6-8% [53]. Частицы ксерогеля «привязаны» к поверхности микрометрической фракции, это облегчает гомогенизацию нанофазы в объеме цементной композиции. В дополнение к этому, при помоле СКД с цементом слабосвязанные между собой наночастицы гидросиликатов отделяются от частиц ксерогеля и распределяются по поверхности частиц вяжущего в виде более мелких агрегатов или изолированных наночастиц (рис. 6) [54]. Такая морфология нанофазы СКД формирует комплексный эффект применения СКД: обеспечивает выраженные водоудерживающий, пластифицирующий эффекты, эффекты ускорения набора прочности цементных композиций [55]. В то же время, высокое содержание микрометрических фракций в составе СКД (рис. 5б) и нахождение наночастиц гидросиликатов в форме частицы ксерогеля снижают ускоряющее действие добавки СКД и обуславливают ее высокие (по сравнению с наносуспензиями [14]) дозировки. С другой стороны, 1,5 часа механохимического синтеза (использованные, например, в [52]) назначались с тем, чтобы обеспечить присутствие микрометрических фракций в СКД и могут быть увеличены для изменения гранулометрического состава СКД.





Рис. 6. Характер взаимодействия частиц СКД с частицами цементного клинкера (Ц+СКД (15%)) после ультразвуковой обработки образца в абсолютном этаноле [54]

3.4. Техника проведения механохимического синтеза

Проведение механохимического синтеза модифицированных сахарозой гидросиликатов кальция – МГС – возможно с использованием планетарной мельницы с регулируемой интенсивностью помола (например, [52, 53]). Это особенно удобно при проведении поисковых исследований. Для промышленной адаптации технологии эффективнее использовать вибрационные мельницы инерционного типа: они обладают простой конструкцией и адаптированы для «мокрого» помола. В условиях стационарного режима работы вибромельницы глубина механохимического синтеза регулируется длительностью помола.

В качестве минерального сырьевого компонента возможно использовать продукты различного происхождения, например, смесь кремнеземистой породы и негашеной извести. В качестве кремнеземистой породы может выступать опока, микрокремнезем, шлаки и даже кварцевый песок. Различия между ними только в характере кристаллической решетки и уровне дисперсности: с ростом кристалличности химическая активность сырья закономерно снижается, что потребует увеличения длительности механохимического синтеза.

В качестве минерального сырья возможно использовать портландцемент, стоимость которого значительно ниже стоимости товарной негашеной извести. Причем к применению пригодны как низкомарочные, так и лежалые цементы со сниженной гидратационной активностью. Высокая гидратационная активность цемента позволяет минимизировать время механохимического синтеза.

Следует отметить, что использование в механохимическом синтезе наногидросиликатов клинкерных минералов цемента хорошо известно [56, 57], недостатком этого варианта является необходимость «отмывать» излишки свободного Ca(OH)₂, образующегося при гидратации алита. В случае комплексного механотермического синтеза излишки свободного Ca(OH)₂ можно «утилизировать» введением в помольную смесь дополнительного количества пуццолана. Таким образом, цементы, в том числе и некондиционные, как минеральное сырье для механохимического синтеза МГС обладают рядом преимуществ, обеспечивающих их сравнительно высокую конкурентность.

3.5. Техника проведения термолиза МГС

Цель проведения термолиза МГС – дегидратация гидросиликатов. При этом условия термолиза достаточно мягкие (до 150 °С), чтобы предотвратить термическое окисление углеводов. Предположительно, перестройка системы водородных связей в системе «силикат—углевод» является причиной разрушения массива модифицированных гидросиликатных фаз и образования наночастиц гидросиликатов (процесс самодиспергирования) [52]. При этом для минимизации эффектов компактизации наночастиц следует снижать температуру синтеза [58], что, в свою очередь, может быть достигнуто снижением пар-





Рис. 7. SAED-анализ продуктов термолиза МГС: а – агрегированная частица в составе ксерогеля СКД; 6 –дифрактограмма агрегированной частицы [52]

циального давления пара воды в процессе термолиза, например, вакуумированием системы и/или применением водопоглотителей. При применении вакуумирования оптимальный температурный диапазон термолиза составляет 120–130 °C [51]. Образующиеся в результате самодиспергирования наночастицы гидросиликатов кальция характеризуются переменным составом и скрытокристаллической структурой (рис. 7).

Обладая избытком поверхностной энергии, наночастицы активно коагулируют и образуют коагулюм — рыхлые частицы ксерогеля, структура которого во многом определяется видом модифицирующего углевода [53].

Таким образом, содержание в составе СКД наноструктурированной фазы – ксерогеля – определяется объемом синтезированного МГС, т.е. длительностью механохимического синтеза, структура ксерогеля – видом углевода и параметрами термолиза.

4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КМТ-СИНТЕЗА

4.1. Эффект созревания

Сырьевые суспензии после помола необходимо подвергать созреванию без доступа воздуха. Это связано с наличием пролонгированного действия механохимического синтеза [22], т.е. продолжением фазовых процессов в течение суток после прекращения помола. Созревание суспензий сопровождается водоотделением и желатинизацией до полной потери подвижности. Величина водоотделения (по ГОСТ 310.6-2020) уменьшается с ростом длительности помола (рис. 8), что характеризует рост содержания в суспензии высокодисперсных фаз.

4.2. Реология помольных суспензий

Содержание высокодисперсной фазы — основной фактор реологии помольных суспензий, однако и содержание углевода также оказывает на нее влияние (рис. 9) [59]. Присутствие сахарозы незначительно увеличивает относительную вязкость исходной водо-цементной суспензии, что, скорее всего, объясняется способностью сахарозы образовывать на поверхности силиката (в присутствии Ca(OH)₂) полимолекулярные адсорбционные сэндвич-структуры из чередующихся молекул сахарозы и ионов Ca2+, связанных с ними координационными связями [60].

Сахароза активно вовлекается как в состав полимолекулярных адсорбционных оболочек, так и в межслоевое пространство синтезируемых гидросиликатных фаз [51]. Вопрос соотношения между адсорбированной и абсорбированной формами углевода остается открытым и требует дальнейшего изучения, но факт снижения равновесной концентрации сахарозы в жидкой фазе суспензии за 3 ч помола с 1,48% до 0,07% свидетельствует об эффективности процессов поглощения углевода силикатными фазами. Стабилизация относительной вязкости помольной суспензии после 6 ч помола может рассматриваться как признак окончания синтеза.





Рис. 8. Изменение водоотделения в ходе созревания суспензии МГС от длительности помола

4.3. Структурно-морфологическое состояние помольных суспензий

Полученные термолизом СКД содержат в своем составе частицы ксерогеля, морфология которых постоянна на всем протяжении механохимического синтеза (рис. 10) [59].

Прямое измерение размеров первичных наночастиц гидросиликатов в составе частиц ксерогеля показало, что увеличение длительности помола сырьевой суспензии меняет характер распределения по размерам первичных наночастиц: стандартное отклонение сокращается вдвое, наблюдается уменьшение (более чем на 20%) медианы, среднего диаметра наночастиц и максимального размера первичных наночастиц гидросиликатов кальция — наблюдаются эффекты вырождения (рис. 11) [59].

4.4. Состояние модифицирующего углевода в структуре СКД

Увеличение длительности механохимического синтеза не влияет на структуру частиц ксерогеля в составе СКД, но определяет их содержание в СКД. Методом EELS-спектроскопии [61] доказано постоянство формы и положения полос поглощения возбужденного С π^* -состояния углерода и возбужденного С σ^* -состояния атомов углерода, входящих в состав углевода (рис. 12) [59] независимо от длительности помола.

4.5. Фазовое состояние гидратных фаз помольной суспензии в процессе механохимического синтеза

Качественный рентгенофазовый анализ (РФА) позволяет контролировать динамику изменений



Рис. 9. Изменение относительной вязкости суспензии МГС (по ВЗ-4) от длительности помола [59]

фазового состава СКД по относительной интенсивности сигналов фаз (по отношению к интенсивности сигнала исходных алито-белитовых фаз цементного клинкера (J_{AEd}) в области углов 2 Θ = 32,4–32,8 град). Зависимость величины сигнала относительной интенсивности слабозакристаллизованных фаз в составе СКД от длительности механохимического синтеза соответствующих МГС носит экстремальный характер с экстремумом при 6 ч помола (табл. 1) [59]. Рост интенсивности этого сигнала обусловлен, в том числе, расходованием клинкерных фаз портландцемента в механохимическом синтезе (сигнал $J_{_{A \ensuremath{\mathsf{ b}} \varphi}}$ используется для сравнения). 15%-ое снижение интенсивности сигнала скрытокристаллических фаз после 6 ч помола обусловлено активизацией кристаллизации скрытокристаллических фаз: в соответствующих образцах СКД наблюдается появление и рост интенсивности сигналов портландита и алюминатов кальция (рис. 13) [59].

Таким образом, 6 ч являются «поворотной» временной точкой в механохимическом синтезе, за которой следует оформление кристаллических гидратных фаз из объема накопленных в ходе механохимического синтеза слабозакристаллизованных фаз.

5. ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СКД В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ МЕХАНОХИМИЧЕСКОГО СИНТЕЗА

Увеличение длительности механохимического синтеза ожидаемо привело к росту удельной поверхности СКД. При этом активизация кристаллизации гидратных фаз после 6-ти часов помола совпадает с замедлением роста удельной поверхности получаемых СКД (рис. 14). Однако роль процессов кристаллизации гидратных фаз в замедлении роста величины





Рис. 10. Морфология частиц ксерогеля в составе СКД (длительность помола): а) СКД (1,5 ч); б) СКД (3 ч); в) СКД (5 ч); г) СКД (7 ч). Морфология частиц МГС – д [59]



2025; 17 (3):

254-272



Образец, длительность м-х синтеза	Число измерений	Средний диаметр, нм	Стандартное отклонение	min, нм	Медиана, нм	тах, нм
СКД, Зч	369	54,42	55,96	7,2	39,6	576
СКД, 4ч	369	53,35	48,76	7,2	42,2	468
СКД, 5ч	369	44,82	42,10	7,2	32,4	351
СКД, 6ч	369	45,61	27,71	7,2	37,6	158
СКД, 7ч	369	39,44	28,02	7,2	32,4	162

Рис. 11. Гранулометрия наночастиц в составе частиц ксерогеля [59]



Рис. 12. EELSспектры частиц ксерогеля СКД, для различной длительности механохимического синтеза: 1 – 4 часа; 2 – 5 часов; 3 – 7 часов [59]



Таблица 1. Изменения интенсивности сигналов слабозакристаллизованных фаз в составе СКД в зависимости от длительности механохимического синтеза МГС [59]

Длительность	Относительная интенсивность сигнала слабозакристаллизованных фаз СКД в интервале углов 20 (J ₍₂₀₎ /J _{АБф})					
механо- химического синтеза МГС, час	Ј _(18–23) /Ј _{АБф}	Ј _(25–38) /Ј _{АБф}	Ј _(41–34) /Ј _{АБф}	Ј _(49–58) /Ј _{АБф}	Суммарная интенсив- ность сигнала	
3	_	4,38	2,54	-	6,93	
4	0,98	3,58	2,09	2,30	8,96	
5	1,16	4,39	1,58	1,98	9,01	
6	0,88	5,70	1,85	2,70	11,14	
7	1,03	5,04	1,03	2,27	9,38	



удельной поверхности СКД требует дополнительного изучения.

Увеличение длительности механохимического синтеза, в целом, сопровождается приростом ранней прочности модифицированных цементных растворов (рис. 15, табл. 2). Исключение составляют добавки СКД трехчасового помола (СКД-3ч) и СКД-4ч: в их присутствии суточная прочность снижена, что связано с замедляющим влиянием свободной сахарозы в составе СКД [62]. Добавки СКД-5ч и СКД-7ч ускоряют набор суточной прочности на 39% и 59% соответственно, что объясняется, с одной стороны, преобладающим ускоряющим действием нанофазы в составе СКД [55], а с другой – ростом доли абсорбированной гидратными фазами сахарозы, т.к. углевод, прочно удерживаемый силикатной матрицей, не способен экстрагироваться в воду затворения и влиять на скорость набора прочности.

Рис. 13. Дифрактограммы СКД, полученных при различной длительности помола: 1 – контроль (цементный камень); 2–6 – СКД, полученные при 3, 4, 5, 6 и 7 ч помола соответственно [59]

- а Алит Са₃SiO₅
- b Белит ү-Са₂SiO₄
- $c CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 10H_2O$
- d 3CaO·Al₂O₃·6H₂O
- e Ca₄Al₂O₂xH₂O
- Et фазы группы эттрингита, в частности Ca₆Fe₂(SO₄)₃(OH)₁₂·25–27H₂O
- g CaSO₄2H₂O
- k CaCO₃
- р Са(ОН)₂ (портландит)
- t фазы группы тоберморита, в частности, 5CaO·6SiO₂·2,5H₂O



2025; 17 (3):

254-272



Рис. 14. Зависимость удельной поверхности СКД (БЭТ) от длительности механохимического синтеза МГС [59]

Рис. 15. Изменения относительной прочности модифицированных цементных растворов (содержание СКД 10%) в зависимости от длительности механохимического синтеза

Таблица 2. Прочность на сжатие (МПа) цементного раствора с добавкой СКД (10 %) в зависимости от длительности механохимического синтеза МГС

Длительность гидратации, сутки		Длительность механохимического синтеза				
	контроль	3 час	4 час	5 час	7 час	
1	4,99	2,55	4,39	5,75	7,97	
3	19,79	21,95	24,88	24,04	27,36	
7	27,36	30,46	35,17	38,06	37,73	
28	41,71	39,25	48,30	48,38	49,06	



Следует отметить, что остаточное содержание негидратированного цемента в составе СКД 5ч и СКД 7ч априори является минимальным в рассматриваемом ряду (3ч–7ч) дисперсий, но при этом именно эти СКД демонстрируют наибольший прирост прочностных характеристик образцов раствора на всех сроках гидратации. Последнее означает, что остаточное содержание негидратированного клинкера в составе СКД не является фактором, определяющим величину прироста прочности модифицированных СКД образцов цементных растворов.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В основе технологии КМТ-синтеза лежит способность гидросиликатов кальция, модифицированных углеводами (в частности, сахарозой), самодиспергироваться при дегидратации с образованием наноструктурированных гидросиликатных фаз. Механизм процесса самодиспергирования – в стадии изучения, но уже сейчас ясны его особенности: мягкие условия термолиза позволяют наноструктурированным фазам СКД находиться в скрытокристаллическом состоянии; в механохимическом синтезе МГС потенциально могут быть использованы не только углеводы, но и другие органические агенты, отвечающие специфическому набору требований к пространственному строению молекулы; минеральным сырьем для комплексного механотермического синтеза экономически целесообразно использовать портландцемент, однако возможно использование и другого кремнеземсодержащего сырья.

При использовании в качестве минерального сырья портландцемента оптимальная длительность механохимического синтеза составляет 6 ч, превышение этого значения приводит к снижению скорости прироста удельной поверхности конечного СКД.

Длительность механохимического синтеза МГС не влияет на морфологию частиц ксерогеля в составе СКД, но улучшает гранулометрические характеристики нанодисперсной фазы и увеличивает объем синтезированных нанофаз.

Компактированная форма наногидросиликатов кальция предопределяет умеренную ускоряющую активность СКД в отношении процессов твердения цементных растворов и высокие дозировки СКД (10%). В то же время СКД увеличивает марочную прочность образцов, что нехарактерно для «CSH-seeds»-добавок.

Комплексный механотермический синтез является новым направлением в синтезе наноразмерных гидросиликатных фаз, базирующимся на специфических свойствах гидросиликатов кальция, модифицированных органическими агентами. Развитие этого направления далеко от завершения, а решение прикладных вопросов тесно связано с развитием теоретической базы, в частности, с приложением подходов концепции неклассической нуклеации к формированию гидросиликатных фаз. Высокий потенциал этой концепции в плане управления свойствами образующихся гидратных фаз определяет потенциал развития комплексного механотермического синтеза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Dorn T., Blask O., Stephan D. Acceleration of cement hydration – A review of the working mechanisms, effects on setting time, and compressive strength development of accelerating admixtures . *Construction and Building Materials*. 2022;323.126554. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126554

2. Рахимбаев Ш.М., Аниканова Т.В., Прокопишина А.В., Погромский А.С. Влияние неорганических электролитов на ускорение схватывания портландцементных систем. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020;55(81):34-38. https:// doi. org/10.36807/1998-9849-2020-55-81-34-38 EDN: DIPRVO

3. Yifei Wang , Lei Lei , Jianhui Liu , Yihan Ma , Yi Liu , Zhiqiang Xiao , Caijun Shi . Accelerators for normal concrete: A critical review on hydration, microstructure and properties of cement-based materials. Cement and Concrete Composites. 2022;134:104762. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104762

4. Saikat Das, Sonalisa Ray, Sudipta Sarkar. Novel agricultural waste based hardening accelerator for early strength development of fly ash-based concrete. *Materials Today*. Proceedings. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.099

5. Самченко С.В., Егоров Е.С. Влияние ультрадисперсной добавки из предварительно гидратированного цемента на свойства цементной пасты. *Техника и технология силикатов*. 2019;26(2):52-57. EDN: DAQXRC

6. Qadri F., Kumar Sudharsan R., Garg N. Impact of CSH seeds on cementitious hydration kinetics: new insights on porosity and microstructure. *Materials Today Communications*. 2024;38:107763. https://doi.org/10.1016/j. mtcomm.2023.107763



7. Zhou F., Meng H., Renji Mi. Influence of CSH grown in situ on steel slag powder on the performance of fresh and hardened cement pastes. *Construction and Building Materials*. 2022;344:128269. https://doi.org/10.1016/j.con-buildmat.2022.128269

8. Khan J. Influence of binary antifreeze admixtures on strength performance of concrete under cold weather conditions. *J. Build. Eng.* 2021;34:102055. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.102055

9. Ратц Е.М., Хряпченкова И.Н. Анализ эффективности применения химических добавок для тяжелого бетона с целью сокращения сроков производства бетонных работ. *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2015;1(2):57-65. EDN: VNUJVF

10. Peter C. Hewlett, Martin Liska . Lea's Chemistry of Cement and Concrete. Elsevier; 2019. 858. https://doi. org/10.1016/C2013-0-19325-7

11. Wu Z., Liu J., Zhang G., Wang Y., Wang Y. Effect of aluminum sulfate alkali-free liquid accelerator with compound alkanol laminine on the hydration processes of Portland cement. *Construction and Building Materials*. 2021;308:125101. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125101

12. Hoang K., Justnes H., Geiker M. Early age strength increase of ash blended cement by a ternary hardening accelerating admixture. *Cement Concr*. *Res.* 2016;81: 59–69. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.11.004

13. Lee T., Lee J., Kim Y. Effects of admixtures and accelerators on the development of concrete strength for horizontal form removal upon curing at 10 °C. *Construction and Building Materials*. 2020;237:117652. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117652

14. Elisabeth J., Thomas M., Dietmar S. Nucleation seeding with calcium silicate hydrate – A review. *Cement and Concrete Research*. 2018;113:74-85. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.07.003

15. Alizadeh, R. Hydration of tricalcium silicate in the presence of synthetic calcium–silicate–hydrate / R. Alizadeh, L. Raki, J. M. Makar, J.J. Beaudoin, I. Moudrakovski. *J. Mater. Chem.* 2009;19:7937–7946. https://doi.org/10.1039/ B910216G

16. G. Land , D. Stephan. The effect of synthesis conditions on the efficiency of CSH seeds to accelerate cement hydration. *Cement and Concrete Composites*. 2018;87:73-78. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.006

17. Liu Y., Jia H., Zhang G., Sun Z., Zheng S. Synthesis and humidity control performances of natural opoka based porous calcium silicate hydrate. *Advanced Powder Technology*. 2019;30(11):2733-2741. https://doi.org/10.1016/j. apt.2019.08.020

18. Vigneshwari Are., Jayaprakash J. Unleash the potential of mechanically activated Iron ore tailings in cement mortar containing silica fume and fly ash. *Materials Letters*. 2024;372:137052. https://doi.org/10.1016/j.matlet.2024.137052

19. Baker E., Soen H., Kempen Mark van, Leest Ad van, et al. Industrial trials using the mineral fraction of municipal solid waste incinerator bottom ash as a filler in unreinforced concrete products. *Progress in Engineering Science*. 2025;2(1):100055. https://doi.org/10.1016/j.pes.2025.100055

20. Hailong Li, Yaqi Peng, Mengxia Xu, Yufeng Wang, Jiamin Ding, Binbin Ma, Lizheng Jin, Shengyong Lu, Jianhua Yan. Use of municipal solid waste incineration fly ash as a supplementary cementitious material: CO_2 mineralization coupled with mechanochemical pretreatment. *Environmental Research*. 2024;242: 117799. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117799

21. Qian Zhang, Bo Liu, Shuying Wang, Xuhang Lu, Qiong Li, Jiling Liu, Siyu Wei, Jiaxing Fan, Shengen Zhang. Effect of wet milling activation on mechanical properties and hydration process of cement composites with blast furnace slag. *Construction and Building Materials*. 2024;427:136298. https://doi.org/10.1016/j.conbuild-mat.2024.136298

22. Guangpeng He, Deyu Kong, Xiaoguang Chen, Shujing Fan, Tao Meng, Jiabin Li Preparation of CSH gels by mechanochemistry and its effects on properties of super-retarded cement-based materials with sucrose. *Cement and Concrete Composites*. 2024;153:105734. https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105734

23. Junjie Zhang, Hongbo Tan, Xingyang He, Rixu Zhao, Jin Yang, Ying Su. Nano particles prepared from hardened cement paste by wet grinding and its utilization as an accelerator in Portland cement. *Journal of Cleaner Production*. 2021;283"124632. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124632

24. Ходаков Г.С. Физика измельчения. М.: Наука, 1972;308. (In Russ.)

25. Byrappa K., Yoshimura M. Hydrothermal Synthesis and Growth of Coordinated Complex Crystals (Part I). 7-Handbook of Hydrothermal Technology. *A Technology for Crystal Growth and Materials Processing*. 2001;415-617. https://doi.org/10.1016/B978-081551445-9.50008-8

26. Алфимова Н. И., Калатози В.В., Карацупа С.В., Вишневская Я.Ю., Шейченко М.С. Механоактивация как способ повышения эффективности использования сырья различного генезиса в строительном материаловедении. Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016;6:85–89. (In Russ.) EDN: VWZDKD



27. Singh A., Bhadauria SS, Thakare AA, Kumar A., Mudgal M., Chaudhary S. Durability assessment of mechanochemically activated geopolymer concrete with a low molarity alkali solution. *Case Studies in Construction Materials*. 2024; 20: e02715. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02715

28. Scrivener K. Advances in understanding cement hydration mechanisms / K. Scrivener, A. Ouzia, P. Juilland, A. Kunhi Mohamed. *Cement and Concrete Research*. 2019;124:105823. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105823

29. Kumar A. The atomic-level structure of cementitious calcium silicate hydrate / A. Kumar, B.J. Walder, A.K. Mohamed, A. Hofstetter, B. Srinivasan, A.J. Rossini, K. Scrivener, L. Emsley, P. Bowen. *J. Phys. Chem.* C. 2007;121:17188-17196. https://doi.org/10.1021/acs.jpcc.7b02439

30. Chun-Cheng, C. Green synthesis of calcium silicate bioceramic powders / Chun-Cheng Chen, Chia- Che Ho, Shao-Yung Lin, Shinn-Jyh Ding. *Ceramics International*. 2015;41:5445–5453. https://doi.org/10.1016/j. ceramint.2014.12.112

31. Schönlein M. A TEM study on the very early crystallization of C–S–H in the presence of polycarboxylate superplasticizers: Transformation from initial C–S–H globules to nanofoils / M. Schönlein, J. Plank. *Cement and Concrete Research*. 2018;106:33–39. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.01.017

32. Vekilov P.G. Nucleation. Cryst . Growth Des. 2010;10:5007-5019. https://doi.org/10.1021/cg1011633

33. Zhiyu Liao, Ankita Yes, Christina Glen Robb, Rebecca Beveridge, Klaas Wynne. Amorphous aggregates with a very wide size distribution play a central role in crystal nucleation. *Chemical Science*. 2024;15(31): 12420-12430. https://doi.org/10.1039/d4sc00452c

34. Jehannin Marie, Rao Ashit, Cölfen Helmut. New Horizons of Nonclassical Crystallization. *J Am Chem Soc.* 2019;141(26):10120–10136. https://doi.org/10.1021/jacs.9b01883

35. De Yoreo J.J. Crystallization by particle attachment in synthetic, biogenic, and geologic environments / JJ De Yoreo, PUPA Gilbert, NAJM Sommerdijk, RL Penn, S. Whitelam, D. Joester, H. Zhang, JD Rimer, A. Navrotsky, JF Banfield, AF Wallace, FM Michel, FC Meldrum, H. Cölfen, PM Dove. Science.2015. 349. (6247).aaa6760. https://doi.org/10.1126/science.aaa6760

36. Gebauer D. The multiple roles of additives in CaCO3 crystallization: a quantitative case study / D. Gebauer, H. Cölfen, A. Verch, M. Antonietti. *Adv. Mater.* 2009;21: 435–439. https://doi.org/10.1002/ADMA.200801614

37. Kato T. Polymer/calcium carbonate layered thin-film composites. *Adv. Mater*.2000;12:1543–1546. https://doi. org/10.1002/1521-4095(200010)12:20<1543::AID-ADMA1543>3.0.CO;2-P

38. Sharanya A.G., Athira V.S., Manohar Swathi. Insights into the role of cane sugar on the strength, microstructure, and durability of air lime mortar. Construction and *Building Materials*. 2025;463:140152. https://doi.org/10.1016/j. conbuildmat.2025.140152

39. Силин П.М. Вопросы технологии сахаристых веществ. М: Пищепромиздат, 1950:298. (In Russ.)

40. Me Ginnis , RA Beet-sugar technology. Reinhold Publishing Corporation. -1951.574. https://doi. org/10.1016/0016-0032(51)90069-5

41. Бобровник Л.Д. Физико-химические основы очистки в сахарном производстве. Киев: Выща школа, 1994:255. (In Russ.)

42. Labgairi K., Jourani A., Kaddami M. An isothermal (30 °C) study of heterogeneous equilibria in the sucrose (C12H22O11)–calcium hydroxide (Ca(OH)2)–water system. *Fluid Phase Equilibria*. 2011;307(1):100-103. https://doi.org/10.1016/j.fluid.2011.03.009

43. Uedaira H. The Relationship between the Acoustic Property and the Hydration of Saccharides / H. Uedaira , M. Ishimura. *Bull. Chem. Soc. Jpn* .1989; 62: 574–575. https://doi.org/10.1246/BCSJ.62.574

44. Galema S.A. Stereochemical aspects of hydration of carbohydrates in aqueous solutions. 3. Density and ultrasound measurements / SA Galema, H. Hoeiland. *The Journal of Physical Chemistry*. 1991;95:5321–5326. https://doi.org/10.1021/j100166a073

45. Бобровник Л.Д., Грехов А.М., Гулыи И.С. Энергетические характеристики структур в водных растворах сахарозы. *Журнал структурной химии*. 1998;39(5):864–872. (In Russ.)

46. Rodriguez-Navarro C. Nonclassical crystallization of calcium hydroxide via amorphous precursors and the role of additives / C. Rodriguez-Navarro, A. Burgos-Cara, F. Di Lorenzo, E. Ruiz-agudo, K. Elert. Cryst. Growth Des. 2020; 20(7): 4418–4432. https://doi.org/10.1021/acs.cgd.0c00241

47. Pesce C., Pescea G.L., Molinari M., Richardson A. Effects of organic additives on calcium hydroxide crystallization during lime slaking. *Cement and Concrete Research*. 2021;139:106254. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106254

48. Guzman P., Lascurain G., Rodriguez-Navarro C., Toniolo L., Goidanich S. Effects of nano- and micro-cellulose on Ca(OH)2 formation: Implications for lime-based binders. *Cement and Concrete Research*. 2025; 192:107851. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107851



49. Benjamin J.S. Origins of saccharide–dependent hydration at aluminate, silicate, and aluminosilicate surfaces / JS Benjamin, A. Rawala, PF Gary, RR Lawrence, G. Vijay, NI Jacob, FC Bradley. *PNAS*. 2011;108(22):8949–8954. https://doi.org/10.1073/pnas.1104526108

50. Smitha B.J. Reactions and Surface Interactions of Saccharides in Cement Slurries / BJ Smitha, GP Funkhouser, LR Roberts, V. Gupta, BF Chmelka. Langmuir: *the ACS journal of surfaces and colloids*. 2012;28:14202–14217. https://doi.org/10.1021/la3015157

51. Шошин Е.А., Строкова В.В. *Перспективы применения углеводов в синтезе силикатов*: монография. Белгород: Изд-во БГТУ, 2022:220. (In Russ.) EDN: KRFVSW

52. Shoshin E.A., Strokova V.V. Mechanochemical technology for obtaining an effective filler based on gaize for cement binders. *Obogashchenie Rud*. 2020; 6 (390): 8-14. https://doi.org/ 10.17580/or.2020.06.02

53. Шошин Е.А., Строкова В.В. Зависимость поровой структуры продуктов термообработки гидросиликатов кальция от стереохимии модифицирующего дисахарида. Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2020;52:63-69. https://doi.org/10.36807/1998-9849-2020-52-78-63-69 (In Russ.) EDN: AYFFGI

54. Шошин Е.А., Строкова В.В. Водоредуцирующий и пластифицирующий эффекты применения добавки синтетических силикатов кальция в цементных композициях. *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие Смеси*. 2019;1(54):18-26. (In Russ.) EDN: OLVPAT

55. Шошин Е.А., Строкова В.В., Козлов Н.А., Грибков Д.С. Повышение эффективности цементных бетонов за счет применения композиционного вяжущего с силикат-кальциевой дисперсией. *ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие Смеси.* 2019;4(57):22-29. (In Russ.) EDN: WVSLAO

56. Jeffrey J. Chen, J. Jeffrey, HFW Taylor Thomas, Hamlin M. Jennings, Solubility and Structure of Calcium Silicate Hydrate. *Cement and Concrete Research*. 2004;34(9):1499-1519. https://doi.org/10.1016/j. cemconres.2004.04.034

57. Tajuelo Rodriguez E., Richardson I. G., Black L., Boehm- Courjault E., Nonat A., Skibsted J. Composition, Silicate Anion Structure and Morphology of Calcium Silicate Hydrates (CSH) Synthesised by Silica-lime Reaction and by Controlled Hydration of Tricalcium Silicate (C3S). *Advances in applied ceramics*. 2015; 114 (7):362–371. https://doi.org/10.1179/1743676115Y.000000038

58. Мелихов И.В. Тенденции развития нанохимии. Рос. Хим. Журнал. 2002;46(5):7-14. (In Russ.)

59. Шошин Е.А., Бабаджанян А.А., Гливенко И.А., Ковалев Д.А. Влияние длительности механохимического синтеза на структурно-морфологические характеристики силикат-кальциевой дисперсии. *Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова.* 2024;1:67-77. https://doi.org/10.34031/2071-7318-2023-9-1-67-77 (In Russ.) EDN: GXFSIH

60. Benjamin J., Smitha Aditya R., Gary Funkhouserb, Lawrence R. Robertsc, Vijay G., Jacob N. Israelachvilia, Chmelka Bradley F. Origins of saccharide-dependent hydration at aluminate, silicate, and aluminosilicate surfaces. *PNAS*. 2011;108(22): 8949–8954. https://doi.org/10.1073/pnas.1104526108

61. Ewels P., Sikora T., Serin V., Ewels CP, Lajaunie L. A Complete Overhaul of the Electron Energy-Loss Spectroscopy and X-Ray Absorption Spectroscopy Database: eelsdb.eu. *Microscopy and Microanalysis*. 2016; 22(3):717–724. https://doi.org/ 10.1017/S1431927616000179

62. Тараканов О.В. Цементные материалы с добавками углеводов. Пенза: ПГАСА, 2003:166. (In Russ.)

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Авторы заявляют о том, что при подготовке статьи не использовались технологии генеративного искусственного интеллекта и технологии, основанные на искусственном интеллекте.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Шошин Евгений Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии» СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия, shoshin234@mail.ru, https://orcid.org/0009-0005-8756-1517

Тимохин Денис Константинович – кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Строительные материалы, конструкции и технологии» СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия, voiced@list.ru, https://orcid.org/0000-0002-1604-1136

Страхов Александр Владимирович – кандидат технических наук, директор УРБАС СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия, strachov83@mail.ru, https://orcid.org/0009-0004-6964-7504



Кочергина Мария Петровна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии» СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия, m-kochergina@list.ru, https://orcid.org/0000-0003-2348-1815

Корольков Георгий Андреевич – аспирант кафедры «Строительные материалы, конструкции и технологии» СГТУ им. Гагарина Ю.А., Саратов, Россия, specstroy22@yandex.ru, https://orcid.org/0009-0000-4166-1698

ВКЛАД АВТОРОВ

Шошин Евгений Александрович – научное руководство; разработка концепции и развитие методологии исследования; анализ результатов исследования.

Тимохин Денис Константинович – анализ результатов исследования; написание исходного текста статьи; составление итоговых выводов.

Страхов Александр Владимирович – составление итоговых выводов.

Кочергина Мария Петровна – сбор и систематизация экспериментальных данных.

Корольков Георгий Андреевич – проведение экспериментальной работы; сбор и систематизация экспериментальных данных.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 16.04.2025; одобрена после рецензирования 06.06.2025; принята к публикации 10.06.2025.