

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМО-ХАРАКТЕРИСТИКИ КЛИНКЕРА АЛЮМОСИЛИКАТНОГО ВЯЖУЩЕГО НА ОСНОВЕ МЕСТНОГО И ТЕХНОГЕННОГО СЫРЬЯ ПРИАРАЛЬЯ ПРИ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОМ ОБЖИГЕ

Сабилова Фарангиз Расул кизи^{1,*}, Матчанов Шерзод Камилович¹, Рузметова Аида Шоназаровна¹

¹ Ургенский государственный университет имени Абу Райхана Беруни, кафедра химических технологий, г. Ургенч, Узбекистан

ORCID (Сабилова Ф.Р.): 0009-0008-0051-9458

* Corresponding author: farangiz.s@urdu.uz

ARTICLE INFO

Dates:
Received: 06.06.2026
Accepted: 12.06.2026
Published: 17.06.2026
DOI:
10.66960/jof.3093-8899.00028
Copyright:
CC BY 4.0

АННОТАЦИЯ

В данной работе исследована возможность получения алюмосиликатных вяжущих материалов на основе местного минерального и техногенного сырья: каолина, известняка, керамических отходов и жидкого стекла. Экспериментальные образцы были получены и подвергнуты термической обработке при температуре 650°C. Термическое поведение и процессы фазообразования изучены методом синхронного термического анализа (DTA/TG). Установлено, что наиболее интенсивные физико-химические превращения в исследуемой системе протекают в интервале температур 650–750°C, что свидетельствует о высокой реакционной активности компонентов в данной области. Результаты термического анализа показали различия в поведении исследованных составов, при этом образец №5 характеризовался наибольшей реакционной способностью и наиболее выраженными термическими эффектами. Полученные результаты подтверждают перспективность использования местного сырья и керамических отходов для получения алюмосиликатных вяжущих материалов.

Ключевые слова: алюмосиликатное вяжущее, каолин, керамические отходы, жидкое стекло, термический анализ, DTA/TG, фазообразование

ANNOTATSIIYA

Ushbu ishda mahalliy mineral va texnogen xomashyolar — kaolin, ohaktosh, keramika chiqindilari hamda suyuq shisha asosida aluminosilikat bog'lovchi materiallar olish imkoniyati o'rganildi. Tajriba namunalari tayyorlanib, 650°C haroratda termik ishlov berildi. Termik xatti-harakat va fazalar hosil bo'lish jarayonlari sinxron termik tahlil (DTA/TG) usuli yordamida tadqiq qilindi. Tadqiq etilgan tizimda eng intensiv fizik-kimyoviy o'zgarishlar 650–750°C harorat oralig'ida sodir bo'lishi aniqlanib, bu mazkur sohada komponentlarning yuqori reaksiya faolligini ko'rsatadi. Termik tahlil natijalari o'rganilgan tarkiblarning xatti-harakatlarida farqlar mavjudligini ko'rsatdi, bunda №5 namuna eng yuqori reaksiya qobiliyati va eng yaqqol termik effektlar bilan tavsiflandi. Olingan natijalar mahalliy xomashyo va keramika chiqindilaridan aluminosilikat bog'lovchi materiallar ishlab chiqarishda samarali foydalanish istiqbolli ekanligini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: aluminosilikat bog'lovchi, kaolin, keramika chiqindilari, suyuq oyna, termik tahlil, DTA/TG, faza hosil bo'lishi

ABSTRACT

This study investigates the possibility of producing aluminosilicate binder materials based on local mineral and technogenic raw materials, including kaolin, limestone, ceramic waste, and liquid glass. Experimental samples were prepared and subjected to thermal treatment at 650°C. The thermal behavior and phase formation processes were examined using simultaneous thermal analysis (DTA/TG). The results showed that the most intensive physicochemical transformations in the investigated system occur within the temperature range of 650–750°C, indicating high reactivity of the components in this region. Thermal analysis revealed differences in the behavior of the studied compositions, with sample No. 5 demonstrating the highest reactivity and the most pronounced thermal effects. The obtained results confirm the potential of utilizing local raw materials and ceramic waste for the production of aluminosilicate binder materials.

Keywords: aluminosilicate binder, kaolin, ceramic waste, liquid glass, thermal analysis, DTA/TG, phase formation

Ссылка для цитирования / How to cite:

Сабилова Ф.Р., Матчанов Ш.К., Рузметова А.Ш. Исследование термо-характеристики клинкера алюмосиликатного вяжущего на основе местного и техногенного сырья Приаралья при низкотемпературном обжиге // Journal of future. 2026. Vol. 2. Iss. 2. pp. 1–4. <https://doi.org/10.66960/jof.3093-8899.00028>

1. Введение

В последние годы значительное внимание исследователей уделяется разработке алюмосиликатных вяжущих материалов, обладающих высокими эксплуатационными характеристиками и пониженным воздействием на окружающую среду. Такие материалы рассматриваются как перспективная альтернатива традиционным цементным системам благодаря возможности использования природного сырья и техногенных отходов.

Согласно исследованиям [1], алюмосиликатные вяжущие системы способны формировать прочную пространственную структуру за счет процессов поликонденсации кремне- и алюминосодержащих компонентов. Автор отмечает высокую химическую и термическую стойкость геополимерных материалов, что расширяет возможности их практического применения.

В работе исследователей [2] показано, что щелочно-активированные алюмосиликатные материалы характеризуются высокой механической прочностью и долговечностью. Особое внимание уделено влиянию состава сырья и условий активации на формирование структуры и свойств вяжущих систем.

Исследования в работе [3] свидетельствуют о том, что использование алюмосиликатного сырья в сочетании со щелочными активаторами позволяет получать материалы с улучшенными физико-механическими характеристиками и повышенной устойчивостью к воздействию агрессивных сред.

Авторы [4] установили, что процессы геополимеризации алюмосиликатов сопровождаются образованием

пространственной трехмерной структуры, обеспечивающей высокие прочностные показатели конечного материала. Авторами также показана важная роль реакционной способности исходного сырья.

По данным работ автора [5], использование техногенных отходов в составе алюмосиликатных вяжущих является эффективным способом ресурсосбережения и снижения экологической нагрузки. Включение отходов в состав вяжущих материалов способствует сокращению объемов промышленного накопления отходов и уменьшению потребления природных ресурсов.

Учёные [6] показали, что применение щелочных активаторов существенно интенсифицирует процессы взаимодействия алюмосиликатных компонентов, обеспечивая формирование прочной структуры материала даже при сравнительно низких температурах обработки.

По мнению авторов статьи [7], ключевое влияние на свойства алюмосиликатных вяжущих оказывает соотношение кремния и алюминия в реакционной системе. Авторы отмечают, что изменение состава исходного сырья и параметров активации позволяет регулировать процессы структурообразования и получать материалы с заданными эксплуатационными характеристиками.

В работе [8] идёт речь о высокой прочности, долговечности и термостойкости алюмосиликатных вяжущих материалов. Кроме того, исследователь подчеркивает перспективность использования

местного минерального сырья и промышленных отходов для получения экологически безопасных строительных материалов нового поколения.

Несмотря на значительное количество исследований, вопросы получения клинкера алюмосиликатных вяжущих на основе каолина, известняка, жидкого стекла и керамических отходов остаются актуальными. Особый интерес представляет изучение процессов фазообразования и термических превращений в таких системах. В связи с этим целью настоящей работы является исследование термического поведения алюмосиликатного вяжущего, полученного на основе местного сырья и техногенных отходов.

2. Методика исследования

В качестве объекта исследования для получения клинкера алюмосиликатного вяжущего использованы и комплексно изучены каолин, известняк, шамотный отход и жидкое стекло.

Для изучения процессов термических превращений и оценки термической устойчивости полученных образцов был проведен синхронный термический анализ (DTA/TG). Для этого все исходные компоненты предварительно подвергались тонкому измельчению в лабораторной шаровой мельнице Pulverisette 6 (Фритч, Германия) до получения однородного порошка. После измельчения материал просеивали через сито размером отверстий 0.06 мм для обеспечения равномерного гранулометрического состава смеси.

Подготовленные компоненты дозировали в соответствии с заданными составами и тщательно перемешивали. Затем в сухую смесь постепенно вводили жидкое стекло до получения однородной пластичной массы. Полученную массу выдерживали и подвергали термической обработке в лабораторной муфельной печи при температуре 650 °С в течение 7 часов.

Исследования выполнялись на приборе LINSEIS STA PT 1600, позволяющем одновременно регистрировать дифференциально-термические и термогравиметрические характеристики материалов. Анализ проводили в диапазоне температур от 25 до 1000 °С с непрерывной регистрацией изменения массы и тепловых эффектов. По результатам термического анализа были определены температурные интервалы основных фазовых превращений, процессы дегидратации, разложения карбонатной составляющей и формирования новых алюмосиликатных фаз.

3. Результаты и их обсуждения

Химический состав исходных компонентов для получения алюмосиликатного клинкера приведены в предыдущих наших работах [9]. В таблице 1 приведены экспериментальные составы алюмосиликатного клинкера.

Таблица 1. Экспериментальные составы алюмосиликатного клинкера.

Компонент	№1	№2	№3	№4	№5	№6
Каолин	35%	37%	39%	41%	43%	45%
Известняк	19%	18%	15%	15%	15%	15%
Шамотный отход	27%	27%	30%	29%	27%	25%
Жидкое стекло	19%	18%	16%	15%	15%	15%
Всего %	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Первые 3 экспериментальных состава при обжиге при 650 °С на 120 минуте обогрели растекли. На рисунке 1 представлены растекшиеся образцы алюмосиликатного клинкера.

Остальные 3 образца при обжиге 650 °С подвергались термическому анализу для выявления термохарактеристик. По результатам анализа были получены кривые дифференциального термического анализа (DTA) и термогравиметрии (TG), позволяющие оценить тепловые эффекты и изменение массы образцов в процессе нагревания. На рисунке 2 представлены



Рисунок 1. Растекшиеся образцы алюмосиликатного клинкера в муфельной печи.

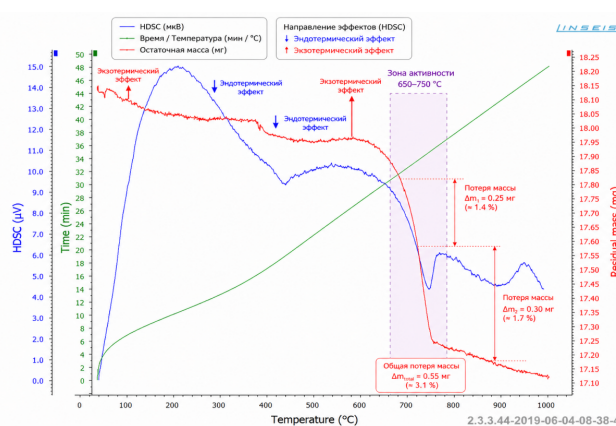


Рисунок 2. DTA/TG-кривые образца №4 после термической обработки при 650 °С.

результаты DTA/TG-анализа образца №4 после термической обработки при 650 °С.

Термическое поведение образца №4 исследовано методом синхронного термического анализа (TG-DSC) в диапазоне температур 25–1000 °С. Анализ TG-кривой показывает, что до температуры около 650 °С образец характеризуется относительно высокой термической стабильностью. В данной области наблюдается лишь незначительное уменьшение массы, обусловленное удалением адсорбированной влаги и остаточных летучих компонентов.

На DSC-кривой в интервале 100–350 °С регистрируется выраженный тепловой эффект, связанный с удалением физически и химически связанной воды, а также с начальными структурными преобразованиями компонентов системы. В области 350–600 °С наблюдаются менее интенсивные тепловые эффекты, свидетельствующие о постепенном протекании процессов дегидратации и перестройки структуры материала.

Основные изменения происходят в интервале температур 650–750 °С. В данной области на TG-кривой фиксируется наиболее интенсивная потеря массы, сопровождаемая отчетливым тепловым эффектом на DSC-кривой. Общая потеря массы в этом диапазоне составляет около 0.55 мг, что соответствует приблизительно 3.1% от первоначальной массы образца. Вероятно, данные изменения обусловлены термическим разложением отдельных минеральных компонентов и формированием новых высокотемпературных фаз.

После 750 °С скорость уменьшения массы значительно снижается, что свидетельствует о завершении основных процессов термического разложения. В высокотемпературной области (750–1000 °С) наблюдаются незначительные тепловые эффекты, которые могут быть связаны с процессами кристаллизации и дальнейшего структурного упорядочения материала.

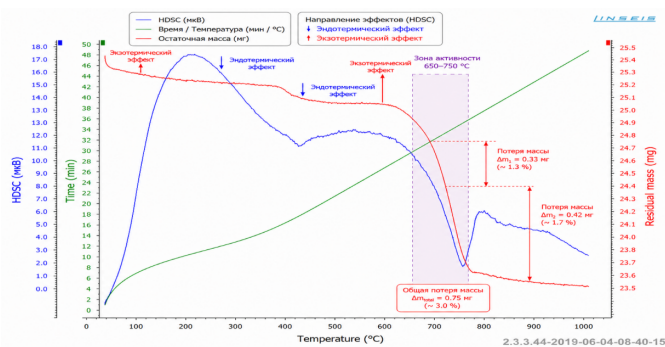


Рисунок 3. DTA/TG-кривые образца №5 после термической обработки при 650 °С.

Остаточная масса образца при температуре 1000 °С составляет около 17.1 мг, что свидетельствует о высокой термической устойчивости исследуемого материала. Таким образом, образец №4 характеризуется стабильностью в широком температурном диапазоне, а наиболее интенсивные физико-химические превращения протекают в области 650–750 °С.

Термическое поведение образца №5 исследовали методом DTA/TG в диапазоне температур 25–1000 °С. Результаты термического анализа представлены на рисунке 3.

Термическое поведение образца №5 исследовано методом синхронного термического анализа (DTA/TG) в диапазоне температур 25–1000 °С. Согласно данным термогравиметрического анализа, до температуры около 600 °С изменение массы образца происходит постепенно и не сопровождается существенными потерями, что свидетельствует об относительной стабильности системы на начальных этапах нагрева.

На DTA-кривой в области 100–350 °С наблюдается выраженный тепловой эффект, связанный с удалением физически адсорбированной влаги и структурными преобразованиями алюмосиликатных компонентов. В интервале 400–600 °С регистрируются дополнительные тепловые эффекты, обусловленные дальнейшими процессами дегидратации и перестройки структуры материала.

Наиболее интенсивные изменения происходят в температурном диапазоне 650–750 °С. В данной области наблюдается резко выраженный тепловой эффект, сопровождающийся значительной потерей массы образца. По сравнению с образцом №4 снижение массы носит более интенсивный характер, что указывает на более высокую реакционную способность исследуемой системы. Вероятно, в этом интервале протекают процессы разложения кальцийсодержащих соединений, дегидроксилирования алюмосиликатных фаз и образования новых минеральных структур.

После 750 °С основные процессы термических превращений завершаются, а дальнейшее изменение массы становится незначительным. Наблюдаемые тепловые эффекты в высокотемпературной области могут быть связаны с кристаллизацией и упорядочением продуктов взаимодействия компонентов системы.

Термическое поведение образца №6 исследовано методом синхронного термического анализа (DTA/TG) в диапазоне температур 25–1000 °С. Состав образца включал 45% каолина, 15% известняка, 25% шамотного отхода и 15% жидкого стекла. Согласно данным термогравиметрического анализа, до температуры около 600 °С изменение массы происходит постепенно и сопровождается незначительными потерями, что свидетельствует о сравнительно высокой термической стабильности системы на начальных стадиях нагрева.

На DTA-кривой в области 80–300 °С наблюдается выраженный тепловой эффект, связанный с удалением физически адсорбированной влаги, остаточной воды

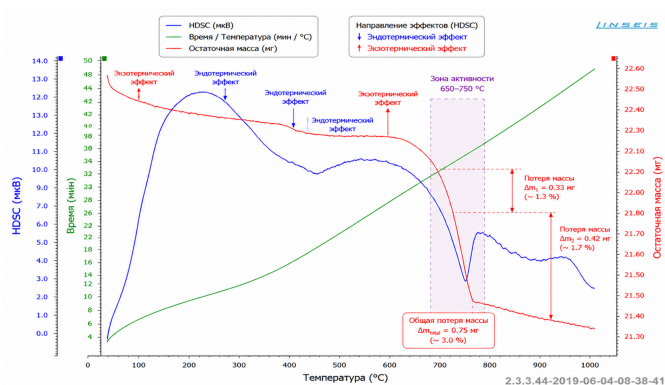


Рисунок 4. DTA/TG-кривые образца №6 после термической обработки при 650 °С.

жидкого стекла и начальной перестройкой структуры алюмосиликатных компонентов. В интервале 400–600 °С фиксируются дополнительные тепловые эффекты, обусловленные дегидроксилированием каолинита и образованием метакаолиновой фазы, а также структурными изменениями алюмосиликатной матрицы.

Наиболее интенсивные термические превращения протекают в диапазоне 650–760 °С. В данной области наблюдается резко выраженный тепловой эффект, сопровождающийся значительной потерей массы образца. Указанные изменения обусловлены разложением карбонатной составляющей известняка с выделением диоксида углерода, а также активизацией взаимодействия между продуктами термической активации каолина, шамотного отхода и силикатной составляющей системы. Высокое содержание каолина способствует увеличению реакционной способности материала и интенсификации процессов фазообразования.

После 760 °С скорость изменения массы существенно снижается, что свидетельствует о завершении основных процессов разложения. В области 800–1000 °С на DTA-кривой наблюдаются дополнительные тепловые эффекты небольшой интенсивности, которые могут быть связаны с процессами спекания, кристаллизации и формированием новых кальций-алюмосиликатных фаз. Вероятно, при данных температурах происходит образование термически устойчивых минеральных соединений, способствующих упрочнению структуры материала.

4. Заключение

Таким образом, образец №6 характеризуется высокой термической активностью в интервале 650–760 °С и интенсивным протеканием процессов фазообразования. Повышенное содержание каолина обеспечивает более глубокие структурные преобразования алюмосиликатной системы и способствует формированию термически устойчивой композиции при высокотемпературной обработке, где наблюдаются основные тепловые эффекты и потери массы, связанные с разложением карбонатной составляющей и формированием новых минеральных фаз.

Сравнительный анализ образцов №1–6 показал, что образец №6, содержащий 45% каолина, 15% известняка, 25% шамотного отхода и 15% жидкого стекла, характеризуется наиболее выраженными процессами фазообразования и формированием термически устойчивой структуры. Для дальнейших исследований получения кликера алюмосиликатного вяжущего нами выбран оптимальным образец №6. Следующие работы будут посвящены получению и изучению комплексных структур алюмосиликатного кликера при более высоких температурах.

Список литературы

- [1] Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. Saint-Quentin, France: Geopolymer Institute, 2020, 855 p.
- [2] Provis J.L. Alkali-activated materials. Cement and Concrete Research, 2018, Vol. 114, pp. 40–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- [3] Shi C., Krivenko P., Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes. London: Taylor & Francis, 2006, 376 p. <https://doi.org/10.4324/9780203390672>

- [4] Xu H., van Deventer J.S.J. The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, 2000, Vol. 59, No. 3, pp. 247–266. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(99\)00074-5](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5)
- [5] Komnitsas K. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. *Minerals Engineering*, 2011, Vol. 24, No. 14, pp. 1526–1532.
- [6] Palomo A., Grutzeck M.W., Blanco M.T. Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 1999, Vol. 29, No. 8, pp. 1323–1329. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(98\)00243-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00243-9)
- [7] Duxson P., Fernandez-Jimenez A., Provis J.L., Lukey G.C., Palomo A., van Deventer J.S.J. Geopolymer technology: the current state of the art. *Journal of Materials Science*, 2007, Vol. 42, pp. 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/s10853-006-0637-z>
- [8] Rangan B.V. Fly Ash-Based Geopolymer Concrete. Research Report GC 4, Curtin University of Technology, Perth, Australia, 2008. <https://doi.org/10.1201/9781420007657.ch26>
- [9] Sabirova F.R., Ruzmetova A.Sh., Matchanov Sh.K. Study of raw material resources for the production of aluminosilicate binders under the conditions of the Aral Sea region. *Modern American Journal of Engineering, Technology, and Innovation*, 2025, Vol. 1, No. 7, pp. 14–21.