



Научная статья

<https://doi.org/10.32523/3136-3385-2026-155-2-27-40>

Характеристика каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече и оценка ее применимости в качестве активной минеральной добавки для цементных композиций

М.А. Джусупова¹ , М.С. Кожахмет² , С.Т. Кульшикова^{*3} 

¹*Кыргызский государственный технический университет им.И.Раззакова, Бишкек, Кыргызстан*

²*Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан*

³*Жезказганский университет имени О.А.Байконурова, Жезказган, Казахстан*

*E mail: dzmahavat@gmail.com, meiram.kms1@gmail.com, *saule.kulshikova@gmail.com*

Аннотация. Исследована каолинсодержащая глина месторождения Кара-Кече как потенциальное сырье для получения активной минеральной добавки к цементным композициям. Выполнена оценка сырьевой базы каолиновых глин Кыргызской Республики и исследованы состав и структурные особенности изучаемого материала. Для оценки характеристик глины использованы методы рентгенофлуоресцентного, рентгенофазового и электронно-микроскопического анализа. Установлено, что глина содержит каолинит 45-55 %, иллит 15-20 % и кварц 25-30 %. Термоактивацию глины проводили при 550-700 °С со скоростью нагрева 100°С/мин и выдержкой 3 часа, после чего измельчали 2-3 минуты в мельнице ударно-роторного типа и вводили взамен 5, 10, 15 % цемента. В ранние сроки твердения 3-7 суток при ведении 15 % глины обеспечивается прирост прочности цементных композиций на 74,3 и 35,6 % по сравнению с контрольным цементом. Для 28 и 90 суток образцов оптимальное количество составило 5 %, где повышение прочности составляет +28,1 и +9,8 % соответственно. Полученные данные свидетельствуют о возможности использования глины месторождения Кара-Кече в качестве минеральной добавки при разработке цементных композиций.

Ключевые слова: каолинсодержащая глина, месторождение Кара-Кече, термическая активация, активная минеральная добавка, пуццолановая активность, цементные композиции

Введение

Развитие строительной индустрии Кыргызстана сопровождается поиском эффективных способов использования местного минерального сырья. Перспективным направлением является получение активных минеральных добавок (АМД) из глин, пригодных для использования в составе композиционных цементных вяжущих и бетонов. Известно, что цементная промышленность занимает одно из самых высоких мест по уровню загрязнений окружающей среды, а использование одной тонны модификаторов бетона в среднем экономит 2,5-3,0 т. цемента. Одним из самых востребованных альтернативных дополнительных цементных материалов являются кальцинированные глины.

Исследователи в обзорной статье [1,2,3] указывают на перспективность частичной замены клинкера кальцинированной глиной, таких как метакаолин. Активность метакаолина зависит от совокупности факторов: химический состав, степень кристалличности, тонкость помола и температура термообработки, однако из-за широкого разнообразия состава их стандартизированное использование весьма затруднительно [3].

При обобщении подходов к активации глин [7] авторами было отмечено, что несмотря на интенсивный интерес к таким материалам и наличие разрозненных данных по наиболее распространенным природным глинам критерии выбора сырья и режимов обработки еще не систематизированы. В обзоре по LC3-системам [8] указан высокий потенциал кальцинированных глин для получения эффективных цементных композиций, но основное внимание сосредоточено на общих преимуществах, ограничениях и перспективах, а вопросы о реакционной способности и выбора оптимальных режимов активации конкретных местных глин не рассматривались.

Исследователями [9] установлено, что глины, кальцинированные при оптимальной температуре, проявляют пуццолановую активность и рассматриваются в качестве компонента для цементных систем. Однако исследование выполнено для другого сырья и не позволяет напрямую перенести полученные результаты на каолинсодержащую глину месторождения Кара-Кече. В работе [10] были изучены смешанные иллит-каолинитовые глины, в которых степень их активации и соответственно реакционная способность зависит от содержания глинистых минералов, кварца и карбонатных примесей. Каолинитовые и монтмориллонитовые кальцинированные глины, как установлено [11], по-разному влияют на сульфатный баланс, раннюю гидратацию и свойства порового раствора цементной системы. То есть минералогический тип исходной глины непосредственно определяет ее поведение после активации. Полученные результаты в данном случае не раскрывают особенности каолинсодержащей глины Кара-Кече.

При оценке реакционной способности кальцинированных иллита, каолинита и монтмориллонита, как показали авторы [12], уровень пуццолановой активности определяется не только температурой обжига, но и минеральной природой сырья; наиболее высокая реакционная способность характерна для каолинитсодержащих систем. Данная работа в большей степени носит фундаментальный характер и не охватывает глины месторождений Центральной Азии. При исследовании кальцинированных каолинит-иллитовых глин [13] авторы установили их способность обеспечивать цементным композициям дополнительный прирост прочности в длительные сроки твердения от 28 до 90 суток. Однако в исследованиях не уделялось внимания предварительной оценке сырья и выбору режима активации для конкретной глины. В работе [14] авторы отмечают, что низкосортные глины могут использоваться для

получения LC3цементных композиций, а их эффективность зависит от реакционной способности, дисперсности и содержания в них минерала каолинита. Однако данные результаты получены на известняково-кальцинированных цементах и не дают ответа на применимость каолинсодержащей глины Кара-Кече в цементных композициях. В работе [15] рассматривали влияние трёх распространённых низкосортных глинистых минералов: каолинита, монтмориллонита и иллита на поведение кальцинированного глиняного цемента LC3. Каолинит показал наибольшую реакционную активность, но из-за ограниченной его доступности рассматривались альтернативные низкокачественные монтмориллонитовые и иллитовые глины, которые также показали свою эффективность. Авторы подчеркивают, что для каждого конкретного сырья необходимы индивидуальные экспериментальные исследования, поскольку универсального режима активации для всех глин не существует. Именно этот нерешенный аспект сохраняется и для каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече. При оценке реакционной способности кальцинированных иллита, каолинита и монтмориллонита, как показали авторы [12], уровень пуццолоановой активности определяется не только температурой обжига, но и минеральной природой сырья; наиболее высокая реакционная способность характерна для каолинитсодержащих систем. Данная работа в большей степени носит фундаментальный характер и не охватывает глины месторождений Центральной Азии. При исследовании кальцинированных каолинито-иллитовых глин [13] авторы установили их способность обеспечивать цементным композициям дополнительный прирост прочности в длительные сроки твердения от 28 до 90 суток. Однако в исследованиях не уделялось внимания предварительной оценке сырья и выбору режима активации для конкретной глины. В работе [14] авторы отмечают, что низкосортные глины могут использоваться для получения LC3цементных композиций, а их эффективность зависит от реакционной способности, дисперсности и содержания в них минерала каолинита. Однако данные результаты получены на известняково-кальцинированных цементах и не дают ответа на применимость каолинсодержащей глины Кара-Кече в цементных композициях. В работе [15] рассматривали влияние трёх распространённых низкосортных глинистых минералов: каолинита, монтмориллонита и иллита на поведение кальцинированного глиняного цемента LC³. Каолинит показал наибольшую реакционную активность, но из-за ограниченной его доступности рассматривались альтернативные низкокачественные монтмориллонитовые и иллитовые глины, которые также показали свою эффективность. Авторы подчеркивают, что для каждого конкретного сырья необходимы индивидуальные экспериментальные исследования, поскольку универсального режима активации для всех глин не существует. Именно этот нерешенный аспект сохраняется и для каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече. Таким образом, анализ современных исследований показывает, что в литературе достаточно подробно раскрыты общие закономерности термоактивации каолинитсодержащих и смешанных глин, а также их влияние на гидратацию и прочность цементных систем. Вместе с тем остаются недостаточно изученными применимость каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече в качестве сырья для активной минеральной добавки, связь ее химико-минералогических особенностей с выбором температурного режима активации и влияние полученного термоактивированного материала на прочность цементных композиций. Предварительная сравнительная оценка каолиновых глин Кыргызстана по химическим составам позволила отметить высокое содержание SiO₂ от 48,5 до 71,5 % и Al₂O₃ от 14,8 до

30,4 %. Сравнительная оценка химического состава каолинсодержащих глин Кыргызстана (табл. 1) показывает, что глина Кара-Кече характеризуется алюмосиликатной природой и по содержанию SiO_2 и Al_2O_3 может рассматриваться как потенциальное сырье для получения активной минеральной добавки.

Таблица 1. Химический состав каолинсодержащих глин Кыргызстана [19].

№	Наименование месторождения каолина	Химический состав сырья, %							Потери при прокаливании
		SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	$\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$	
1	Чокобулак	48,5	30,4	1,38	0,65	-	-	-	-
2	Оргочёр	59,96	26,69	1,2	0,09	-	-	3,89	-
3	Согуты	53,51	33,2	1,96	0,29	0,21	0,61	-	11,14
4	Кара-Кече	61,84	21,63	1,68	0,81	0,2	0,88	-	9,92
5	Кок-Мойнок	52,7	29,55	1,45	0,31	0,80	0,79	-	8,43
6	Сулукта	69,5	25,2	4,9	-	-	-	-	-
7	Кара-Булун	68,5	22,2	0,98	0,25	-	-	-	-
8	Таш-Кумыр	71,5	19,2	0,89	0,81	0,6	0,81	-	0,26
9	Кызыл-Кия	65,84	14,8	4,35	-	2,85	1,76	-	6,72
10	Каолин Моск.район	61,42	19,15	1,95	0,92	-	0,9	2,87	-
11	Кеминский район	65,32	22,18	0,9	-	0,24	1,8	-	9,8

Исследования отечественных ученых были направлены на изучение особенностей фазового состава и структурно-фазовых превращений при обжиге глинистого сырья месторождений Чоко-Булак, Кок-Мойнок, Кара-Кече, Согуты, а также проводилось сравнение с импортируемым Глуховецким каолином (Украина). При анализе данных РФА выяснено, что местные глины ближе к каолинам. Глины месторождений Чоко-Булак и Кок-Мойнок имеют более высокое содержание каолинита, чем глина Кара-Кече. После термообработки (обжига) глин до температуры до 600 оС происходит деструкция кристаллической решетки каолинита с образованием промежуточных фаз [18, 21]. Но основной целью их исследования было изучение каолинсодержащих глин для получения адсорбента и для регулирования технологических свойств керамических изделий.

В связи с этим целью настоящего исследования является характеристика каолинсодержащей глины месторождения Кара-Кече и оценка ее применимости после термической активации в качестве активной минеральной добавки для цементных композиций.

Методология

В качестве исходного минерального сырья в исследовании использовали каолинсодержащую глину Кара-Кече (Кыргызстан), отобранную из покровной части угольного пласта (рис. 1а). По предварительным данным глина относится к гидрослюдисто-каолинитовым разновидностям. В качестве вяжущего применяли портландцемент ПЦ 400 Д20 производства цементного завода г. Кант (Кыргызстан). Химический состав цемента, %: SiO_2 – 22,57; Al_2O_3 – 4,87; Fe_2O_3 – 4,24; CaO – 65,39; MgO – 1,79; SO_3 – 0,36; потери при прокаливании – 0,25. Минералогический состав

портландцемента, %: C_3S – 63,2; C_2S – 15,8; C_3A – 5,6; C_4AF – 12,6.

Для повышения реакционной способности глинистого сырья применяют различные способы активации, однако для получения активных минеральных добавок, используемых в цементных композициях, наибольшее практическое значение имеет термическая активация путем кальцинации [3, 21].



а)



б)

Рисунок 1. а) глина месторождения Кара-Кече; б) порошок термоактивированной глины Кара-Кече

В настоящем исследовании термическую активацию глины Кара-Кече осуществляли в электрической муфельной печи со скоростью нагрева $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ в интервале температур $550\text{--}700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Продолжительность изотермической выдержки составляла 3 часа, после чего охлаждение образцов глины осуществляли в печи до комнатной температуры. После термообработки глину измельчали в лабораторной мельнице ударно-роторного типа FW-100 в интервале 2–3 минуты.

экспериментальной оценки прочностных характеристик цементных композиций были изготовлены образцы размером $2 \times 2 \times 2\text{ см}$. Термоактивированную глину Элементный состав глины определяли методом волнодисперсионной рентгенофлуорисцентной спектроскопии (WDXRF) на приборе S2 PUMA (Bruker AXS, Германия). Анализ проводили в вакуумном режиме при напряжении рентгеновской трубки до 50 кВ. Порошковые образцы глины предварительно высушивали и прессовали в таблетки. Содержание основных оксидов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O и др.) определяли по интенсивности характеристических линий элементов с последующей автоматической обработкой результатов в штатном программном обеспечении прибора.

Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре D6 PHASER (Bruker AXS, Германия) с использованием $\text{Cu-K}\alpha$ излучения ($\lambda = 1,5406\text{ \AA}$) при 30 кВ и 10 мА. Съёмку проводили в диапазоне $2\theta = 5\text{--}80^{\circ}$ с шагом $0,02^{\circ}$ в геометрии θ - 2θ . Идентификацию фаз выполняли с использованием базы данных PDF-2 (ICDD), а количественный фазовый анализ – методом Ритвельда с использованием программного обеспечения TOPAS (Bruker). Микроструктурные исследования проводили методом сканирующей электронной

микроскопии на микроскопе Hitachi TM4000Plus при ускоряющем напряжении 5, 10 и 15 кВ с использованием системы энергодисперсионного микроанализа.

Для предварительной вводили взамен части цемента в количестве 5, 10 и 15 % от его массы. Составы различались температурой получения минеральной добавки (550 и 700 °С) и продолжительностью измельчения в мельнице (2 и 3 мин.). Из каждого состава изготавливали не менее 6 образцов и рассчитывали среднее значение. Прочность цементных образцов оценивали в установленные сроки твердения: 3, 7, 28 и 90 суток.

Результаты и обсуждение

По минералогическому составу глина Кара-Кече относится к гидрослюдисто-каолининовым (табл. 1), для подтверждения возможности получения активных минеральных добавок была изучена микроструктура, оценен ее химический, фазовый, минеральный составы.

Микроструктурный и элементный анализ показал, что матрица глины Кара-Кече агрегатно-пластинчатая, частично ориентированная, пористая. Наблюдаются микротрещины, зоны флокуляции и контрастные включения, характерные для Fe-оксидов и их гидратов (рис.2). По морфологическим признакам можно выделить минералогические фазы каолинита и иллита в виде тонких пластинчатых частиц, образующих слоистую матрицу. Кварц и полевые шпаты встречаются редко и представлены угловатыми зёрнами с гладкими поверхностями. Распределённые неравномерно оксиды и гидроксиды железа в виде точечных или плёночных контрастных включений. Карбонаты кальция/магния в виде светлых зон без выраженной чешуйчатой структуры. SEM-анализ подтвердил наличие тонкодисперсной пластинчатой матрицы с преобладанием алюмосиликатов, что указывает на преобладание элементов Si, Al и O и позволяет предполагать о повышении пуццоланической активности после термообработки.

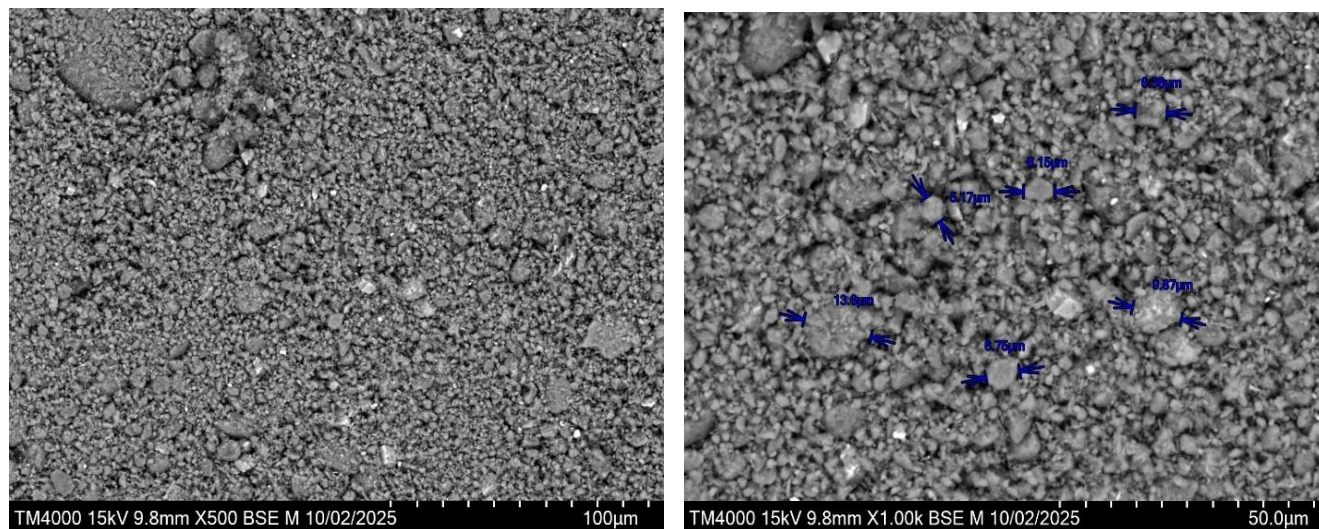


Рисунок 2. SEM-изображение глины Кара-Кече при разрешении $\times 500$ и $\times 1.00k$

Минералогический состав глины Кара-Кече по основным рефлексам (2θ , °) представлен

следующими минералами: каолинит $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ – 12,3; 24,8; 38,5; иллит $\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ – 8,9; 17,7; 27,8; кварц SiO_2 – 20,8; 26,6; 50,1; 60,0; полевой шпат (ортоклаз/ альбит) – 27,6; 30,0; 56,3; гематит Fe_2O_3 – 33,1; 35,6; 54,0 и кальцит CaCO_3 – 29,4; 47,3. Результаты рентгенофазового анализа (рис.3) позволили установить, что основной глинистой фазой является минерал – каолинит (45-55 %) с дополнительным содержанием иллита (15-20 %). К неглинистым фазам относят кварц (25-30 %), полевые шпаты (5-10 %), Fe-оксиды (до 5 %), кальцит (следы до 2 %). Соотношение $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ приблизительно 2:1, характерное для каолинито-кварцевых смесей указывают на возможность термоактивации глины Кара-Кече в глинист нежели в метакеолин. По тепловыделению прогноз по фазовым превращениям указывает, что при температуре 450–600 °C происходит дегидроксилирование каолинита и переход в метакеолин.

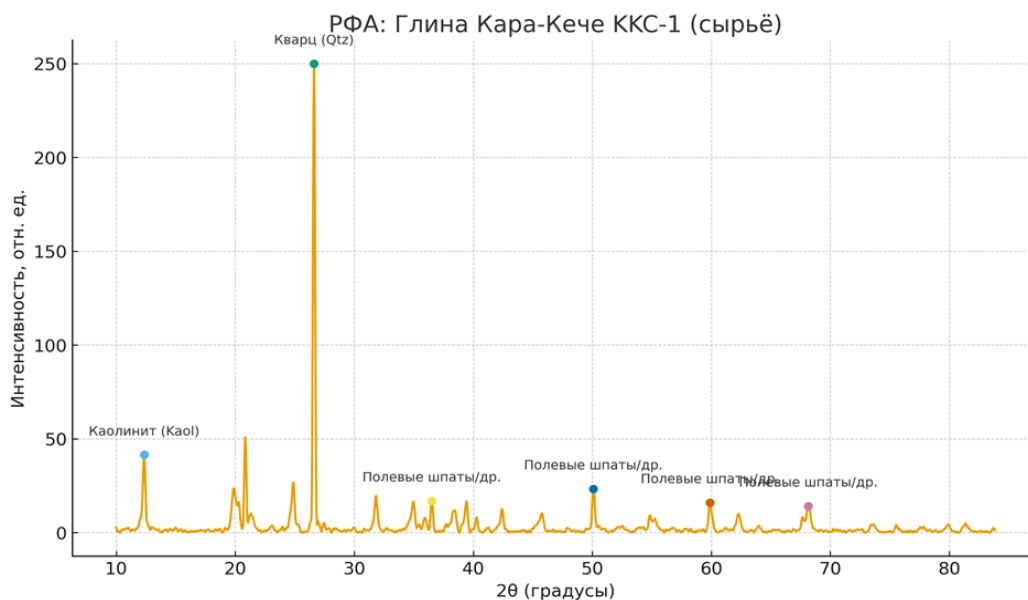


Рисунок 3. Дифрактограмма глины месторождения Кара-Кече

При 650–800 °C формируется аморфная алюмосиликатная матрица. При повышении температуры > 950 °C будет происходить переход в муллит и кристобалит. Для оценки влияния активной минеральной добавки на прочность цементных композиций были проведены предварительные экспериментальные исследования. Полученные данные по прочности при сжатии в возрасте 3, 7, 28 и 90 суток приведены в табл. 2. Нормальная густота цементного теста НГ–25,5 %. Результаты предварительных испытаний (табл. 2) цементных композиций с термоактивированной глиной Кара-Кече свидетельствуют о существенном влиянии на прочность в ранние и поздние сроки твердения рецептурно-технологических параметров: температуры обжига, содержания добавки и продолжительности измельчения. В качестве контрольного принят состав на чистом цементе без добавки, прочность которого на 3-и сутки $R^3_{сж} = 56$ МПа, на 7-е сутки $R^7_{сж} = 71,0$ МПа, на 28-е сутки $R^{28}_{сж} = 114,0$ МПа и через 90 суток $R^{90}_{сж} = 146,6$ МПа. Анализ полученных данных показал, что наиболее выраженное положительное влияние на прочность оказывают составы с глиной, обожженной при 700 °C. При данной температуре обеспечивается максимальная степень термической активации глины и сопровождается

ростом пуццоланической активности, что способствует ускорению взаимодействия с гидроксидом кальция и формированию дополнительных гидросиликатных и гидроалюмосиликатных новообразований. В отличие от глины, активированной при 700°C, цементные композиции с глиной, обожженной при 550°C, характеризуются менее устойчивым эффектом реакционной способности. В отдельных случаях наблюдается повышение прочности, однако при дозировках 10-15 % часть составов уступает контрольному составу, особенно в 28- и 90- суточном возрасте.

Таблица 2. Прочность цементных композиций с термоактивированной глиной Кара-Кече

№ состава	Количество глины после обжига, % от массы цемента	Температура обжига, °С	Время измельчения, мин	R ³ _{сж} , МПа	R ⁷ _{сж} , МПа	R ²⁸ _{сж} , МПа	R ⁹⁰ _{сж} , МПа
Контрольный	0	-	-	56,0	71,0	114,0	146,6
1	5	550	2	58,8	75,7	131,3	154,5
2	5	550	3	59,4	71,1	126,6	148,7
3	5	700	2	69,7	81,2	131,0	143,8
4	5	700	3	76,0	76,3	146,0	161,0
5	10	550	2	54,0	74,0	109,3	128,7
6	10	550	3	46,5	69,3	122,6	146,0
7	10	700	2	71,5	92,5	128,0	142,5
8	10	700	3	78,5	86,8	141,1	156,7
9	15	550	2	63,7	74,3	109,5	127,7
10	15	550	3	76,7	77,8	117,0	137,2
11	15	700	2	70,8	89,0	133,3	142,9
12	15	700	3	97,6	96,3	140,1	154,8

На повышение реакционной способности существенное влияние оказывает также время измельчения. При увеличении продолжительности помола с 2 до 3 минут наблюдается рост прочности цементных композиций, особенно на 3-и и 28 суток. Данная тенденция объясняется увеличением удельной поверхности термоактивированной глины и улучшением равномерности ее распределения в цементной матрице. Причем положительный эффект от измельчения следует сочетать с температурой обжига и дозировкой добавки, что подтверждает сложный характер взаимодействия исследуемых факторов.

Следует отметить, что увеличение количества термоактивированной глины в цементных композициях не всегда приводит к пропорциональному росту их прочности. Наиболее высокие показатели долговременной прочности 28 и 90 суток получены при дозировке 5 % от массы цемента. Тогда как в ранние сроки более выраженный эффект наблюдается при введении 10–15 %. Полученные данные указывают на необходимость соблюдения оптимального баланса содержания активированной глины, превышение которого может сопровождаться эффектом разбавления цементной системы и снижением вклада клинкерной части в формирование прочного цементного камня.

Наибольшее значение прочности на 3-и сутки $R^3_{сж} = 97,6$ МПа наблюдается у состава № 12 (15 % минеральной добавки, 700 °С, 3 мин. помол), что выше контрольного состава на 74,3 %. На 7-е сутки показатель прочности достигает $R^7_{сж} = 96,3$ МПа, что выше контрольного на 35,6 %. Далее для $R^{28}_{сж} = 140,1$ МПа прирост составил 22,9 % и на 90-е сутки для $R^{90}_{сж} = 154,8$ МПа прирост 5,6 %. Наибольшие значения прочности на 28-е и 90-е сутки зафиксированы для №4 с содержанием 5 % термоактивированной глины, полученной при 700 °С и измельчением 3 мин. Показатель прочности $R^{28}_{сж} = 146,0$ МПа на 28,1 % выше контрольного значения и $R^{90}_{сж} = 161,0$ МПа выше контрольного на 9,8 %. Это свидетельствует о том, что при минимальном содержании добавки, обожженной при 700 °С и помоле 3 минуты обеспечиваются благоприятные условия для формирования плотной и прочной структуры цементного камня в длительные сроки твердения.

Для состава №8 (10 %; 700 °С; 3 мин) наблюдаются также высокие показатели прочности, превышающие контрольный: $R^3_{сж} = 78,5$ МПа, $R^7_{сж} = 86,8$ МПа, $R^{28}_{сж} = 141,09$ МПа и $R^{90}_{сж} = 156,7$ МПа, где прирост составляет 40,2; 22,3; 23,8 и 6,9% соответственно. Данные свидетельствуют об эффективности введения минеральной добавки в широком диапазоне.

Для составов с активированной глиной при 550 °С даже при высокой степени активации не обеспечивается равнозначная прочность с контрольным образцом. Так составы № 5 и № 9 имеют меньшие значения в 28- и 90-суточном возрасте по сравнению с контрольным. Для состава № 5 $R^{28}_{сж} = 109,3$ МПа и $R^{90}_{сж} = 128,7$ МПа, что ниже контрольного на 4,1 % и 12,2 %. Для состава № 9 $R^{28}_{сж} = 109,5$ МПа и $R^{90}_{сж} = 127,7$ МПа, что ниже контрольного на 3,9 и 12,9%. Это указывает на недостаточную термическую активацию глины при 550 °С, что не обеспечивает необходимый уровень ее реакционной способности.

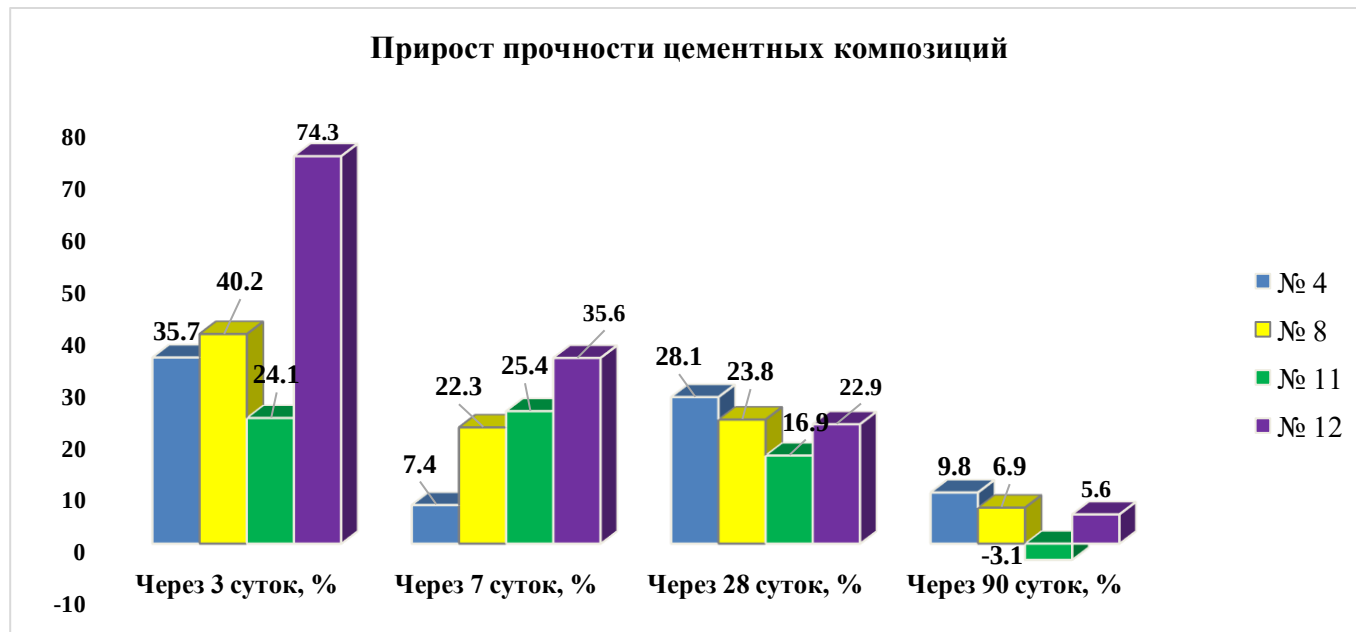


Рисунок 4. Прирост прочности цементных композиций с термоактивированной глиной Кара-Кече относительно контрольного состава

На рисунке 4 наглядно можно пронаблюдать относительно контрольного состава прирост прочности цементных композиций при введении термоактивированной глины

Кара-Кече, который в ранние сроки твердения наблюдается у составов № 8 и № 12, тогда как наиболее высокие показатели в 28- и 90-суточном возрасте характерны для состава № 4. При сопоставлении полученных результатов прочности цементных композиций в разные сроки твердения выявлены две основные тенденции. Первая заключается в том, что в ранние сроки твердения наиболее эффективными оказались составы с наибольшим содержанием минеральной добавки, активированной при максимальной температуре 700 °С и времени помола 3 минуты.

Вторая тенденция состоит в том, что максимальные значения прочности на 28-е и 90-е сутки обеспечиваются при умеренной (оптимальной) дозировке добавки, полученной при тех же условиях подготовки. Это свидетельствует о различии механизмов, определяющих раннее и позднее структурообразование. Если на начальных стадиях важна интенсификация процессов гидратации и нуклеации, то в позднем возрасте решающее значение приобретают плотность структуры и сбалансированность фазового состава цементного камня.

Таким образом, по результатам предварительного эксперимента можно говорить о перспективности применения термоактивированной глины Кара-Кече в качестве активной минеральной добавки в цементных композициях, позволяющих не только снизить содержание цемента, но и значительно повысить их прочностные и структурные показатели.

Заключение

В результате исследования установлено, что каолинсодержащая глина месторождения Кара-Кече по химическому и минералогическому составу является перспективным алюмосиликатным сырьем для получения активной минеральной добавки. По данным SEM- и XRD-анализа в составе глины преобладают каолинит, иллит и кварц, а выявленные структурные особенности указывают на возможность повышения реакционной способности материала после термической активации. Предварительные испытания цементных композиций показали, что наиболее выраженный положительный эффект по прочности достигается при использовании термоактивированной глины, полученной при 700 °С и измельченной в течение 3 мин. Полученные данные подтверждают перспективность использования глины месторождения Кара-Кече для получения активной минеральной добавки для производства цементных композиций с повышенными прочностными свойствами

Вклад авторов.

Джусупова М.А. Обоснование концепции исследования (формулирование идеи, исследовательских целей и задач) Разработка методологии исследования Планирование исследований (подбор рецептуры, температура обжига и количество вводимой активной минеральной добавки)

Кульшикова С.Т. Сбор, анализ и обобщение данных литературы, редактирование текста рукописи - Оформление рукописи Работа с графическим материалом

Кожухмет М.С. Написание текста рукописи - Критический пересмотр текста рукописи (включая этапы до или после публикации рукописи)

Список литературы

1. Sabir, B.; Wild, S.; Bai, J. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review. *Cem. Concr. Compos.* 2001, 23, 441-454. [Google Scholar] [CrossRef]
2. Sperinck, S., Raiteri, P., Marks, N., Wright, K. Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin -a molecular dynamics study.// *Journal of Materials Chemistry*. 2011. vol. 21. PP. 2118-2125. <https://doi.org/10.1039/C0JM01748E>
3. Overmann, S.; Vollpracht, A.; Matschei, T. Reactivity of Calcined Clays as SCM-A Review. *Materials* 2024, 17, 312. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
4. Дворкин, Л. И., Житковский, В. В., Дворкин, О. Л., Разумовский, А. Р. Метакаолин - эффективная минеральная добавка для бетонов. *Технологии бетонов*. – 2015. – № 9-10(110-111). – С. 21-24. – EDN UYFAZF.119 pp.
5. Рахимов, Р. З., Рахимова, Н. Р., Стоянов, О. В. Глинистые пуццоланы. Часть 1. Обзор. *Вестник технологического университета*. 2016. Т.19, №1
6. Dhandapani Y. et al. Fresh properties of concrete containing calcined clays: a review by RILEM TC 282-CCL. *Materials and Structures*. 2022. Vol. 55. Art. 151. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01971-3>
7. Meng D., Djobo J.N.Y., Segura I.P., Kaze R.C., Kuenzel C., Ranjbar N. Clay activation: A review. *Materials Today*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.11.024>
8. Ghazy M.F., Maaty E.S.A., Elaty M.A., Alrwashdeh A.A. A comprehensive review of limestone calcined clay cement (LC3): Environmental and properties benefits, challenges, opportunities, and future directions. *Results in Engineering*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108319>
9. Pinheiro V.D., Abreu R.F.d., Alexandre J., Xavier G.d.C., Marvila M.T., de Azevedo A.R.G. Pozzolanic Potential of Calcined Clays at Medium Temperature as Supplementary Cementitious Material. *Sustainability*. 2024. Vol. 16. Art. 7508. <https://doi.org/10.3390/su16177508>
10. Keppert M., Pommer V., Šádková K. et al. Thermal activation of illitic-kaolinitic mixed clays. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2024. Vol. 149. P. 10533–10544. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13342-x>
11. da Silva M.R.C., Andrade Neto J.S., Walkley B. et al. Effects of kaolinite and montmorillonite calcined clays on the sulfate balance, early hydration, and artificial pore solution of limestone calcined clay cements (LC3). *Materials and Structures*. 2024. Vol. 57. Art. 187. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02462-3>
12. Dhandapani Y., Subramanian K.K., Kanavaris F., Black L., Bernal S.A. The meta-kaolinite content of the calcined clay source impacts the mechanical and durability performance of blended Portland concrete. *Cement and Concrete Research*. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107922>
13. Rehman M.U., MacLeod A.J.N., Aldridge L. et al. Differences in hydration kinetics and phase development of Australian bentonite and kaolinite based limestone calcined clay cements. *Materials and Structures*. 2025. Vol. 58. Art. 226. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02743-5>
14. Flegar Pregernik M., Serdar M. Long-Term Hydration Study of Blended Cement: Calcined Kaolinite-Illite Composite Clays Compared to Fly Ash. *Materials*. 2025. Vol. 18. Art. 5123. <https://doi.org/10.3390/ma18225123>

15. Blouch N., Kazmi S.N.H., Akram N., Saleem M.J., Khan I.A., Javed K., Ahmad S., Khan A. Performance Evaluation of Low-Grade Clay Minerals in LC3-Based Cementitious Composites. *Solids*. 2025. Vol. 6. Art. 35. <https://doi.org/10.3390/solids6030035>
16. Bakera, A.T.; Alexander, M.G. Use of metakaolin as supplementary cementitious material in concrete, with focus on durability properties. *RILEM Tech. Lett.* 2019, 4, 89–102. [Google Scholar] [CrossRef]
17. Thankam, G.L.; Renganathan, N.T. Ideal supplementary cementing material-Metakaolin: A review. *Int. Rev. Appl. Sci. Eng.* 2020, 11, 58-65. [Google Scholar]
18. Боркоев, Б.М. Особенности фазового состава и структурно-фазовые превращения при обжиге керамического сырья Кыргызской Республики. // Вестник КГУСТА, 2016, №2(52), с.139-144.
19. Дженчураев, Д.Д., Дженчураева, А.В. Георесурсы неметаллорудного сырья Тянь-Шаня и их рациональное использование. Издательство КРСУ, Бишкек, 2021 г., 370 стр., УДК: 553.6 (235.216), ISBN: 978-9967-19-809-8- 11. 4.
20. Hanein, T., Thienel, K.C., Zunino, F. et al. Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL. *Mater Struct* 55, 3 (2022). <https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-1> Маймеков, З.К. и др. Физико-химические и термодинамические характеристики каолиновой глины Чоко-Булакского месторождения при различных температурах ее деструкции. *Известия НАН КР*, 2023, №7, с.32-38.

M. Dzhusupova ¹, M. Kozhakhmet ², S. Kulshikova ^{*3}

¹ *I. Razzakov Kyrgyz State Technical University, Bishkek, Kyrgyzstan*

² *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

³ *Zhezkazgan University named after O.A. Baikonurov, Zhezkazgan, Kazakhstan*

Characterization of kaolin-containing clay from the Kara-Keche deposit and evaluation of its suitability as an active mineral additive for cement composites

Abstract. The kaolin-containing clay of the Kara-Keche deposit has been studied as a potential raw material for obtaining an active mineral additive to cement compositions. The assessment of the raw material base of kaolin clays of the Kyrgyz Republic was carried out, and the composition and structural features of the studied material were investigated. Methods of X-ray fluorescence, X-ray phase and electron microscopic analysis were used to evaluate the characteristics of clay. It was found that the clay contains kaolinite 45-55%, illite 15-20% and quartz 25-30%. The clay was thermally activated at 550-700 °C with a heating rate of 100C/min and held for 3 hours, after which it was ground for 2-3 minutes in a rotary impact mill and 5, 10, 15% cement was introduced instead. It has been found that the best strength results are achieved by thermal activation of 700 °C clay, but the optimal amount of clay in the cement composition depends on the age of the samples. In the early stages of hardening, 3-7 days, when 15% clay is applied, the strength of cement compositions increases by 74.3 and 35.6% compared to the control cement. For 28 and 90 daily samples, the optimal amount was 5%, where the increase in strength is +28.1 and +9.8%, respectively. The data obtained indicate the possibility of using clay from the Kara-Keche deposit as a mineral additive in the development of cement compositions

Keywords: kaolin-containing clay, Kara-Keche deposit, thermal activation, active mineral additive, pozzolan activity, cement compositions

References

1. Sabir, B.; Wild, S.; Bai, J. *Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: A review*. Cem. Concr. Compos. 2001, 23, 441–454.
2. Sperinck, S.; Raiteri, P.; Marks, N.; Wright, K. *Dehydroxylation of kaolinite to metakaolin - a molecular dynamics study*. Journal of Materials Chemistry. 2011. Vol. 21. PP. 2118–2125. <https://doi.org/10.1039/C0JM01748E>
3. Overmann, S.; Vollpracht, A.; Matschei, T. *Reactivity of Calcined Clays as SCM-A Review*. Materials. 2024, 17, 312. <https://doi.org/10.3390/ma17020312>
4. Dvorkin, L. I., Zhitkovskiy, V. V., Dvorkin, O. L., Razumovskiy, A. R. *Metakaolin - effektivnaya mineralnaya dobavka dlya betonov*. Tekhnologii betonov. 2015. № 9-10(110-111). S. 21-24. EDN UYFAZF.
5. Rakhimov, R. Z., Rakhimova, N. R., Stoyanov, O. V. *Glinistye putstsolany. Chast 1. Obzor*. Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2016. T.19, №1.
6. Dhandapani Y. et al. *Fresh properties of concrete containing calcined clays: a review by RILEM TC 282-CCL*. Materials and Structures. 2022. Vol. 55. Art. 151. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01971-3>
7. Meng D., Djobo J.N.Y., Segura I.P., Kaze R.C., Kuenzel C., Ranjbar N. *Clay activation: A review*. Materials Today. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.11.024>
9. Ghazy M.F., Maaty E.S.A., Elaty M.A., Alrwashdeh A.A. *A comprehensive review of limestone calcined clay cement (LC3): Environmental and properties benefits, challenges, opportunities, and future directions*. Results in Engineering. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.108319>
10. Pinheiro V.D., Abreu R.F.d., Alexandre J., Xavier G.d.C., Marvila M.T., de Azevedo A.R.G. *Pozzolanic Potential of Calcined Clays at Medium Temperature as Supplementary Cementitious Material*. Sustainability. 2024. Vol. 16. Art. 7508. <https://doi.org/10.3390/su16177508>
11. Keppert M., Pommer V., Šádková K. et al. *Thermal activation of illitic-kaolinitic mixed clays*. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. 2024. Vol. 149. P. 10533–10544. <https://doi.org/10.1007/s10973-024-13342-x>
12. da Silva M.R.C., Andrade Neto J.S., Walkley B. et al. *Effects of kaolinite and montmorillonite calcined clays on the sulfate balance, early hydration, and artificial pore solution of limestone calcined clay cements (LC3)*. Materials and Structures. 2024. Vol. 57. Art. 187. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02462-3>
13. Dhandapani Y., Subramanian K.K., Kanavaris F., Black L., Bernal S.A. *The meta-kaolinite content of the calcined clay source impacts the mechanical and durability performance of blended Portland concrete*. Cement and Concrete Research. 2025. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.107922>
14. Rehman M.U., MacLeod A.J.N., Aldridge L. et al. *Differences in hydration kinetics and phase development of Australian bentonite and kaolinite based limestone calcined clay cements*. Materials and Structures. 2025. Vol. 58. Art. 226. <https://doi.org/10.1617/s11527-025-02743-5>
15. Flegar Pregernik M., Serdar M. *Long-Term Hydration Study of Blended Cement: Calcined Kaolinite-Illite Composite Clays Compared to Fly Ash*. Materials. 2025. Vol. 18. Art. 5123. <https://doi.org/10.3390/ma18225123>

16. Blouch N., Kazmi S.N.H., Akram N., Saleem M.J., Khan I.A., Javed K., Ahmad S., Khan A. *Performance Evaluation of Low-Grade Clay Minerals in LC3-Based Cementitious Composites*. Solids. 2025. Vol. 6. Art. 35. <https://doi.org/10.3390/solids6030035>
17. Bakera, A.T.; Alexander, M.G. *Use of metakaolin as supplementary cementitious material in concrete, with focus on durability properties*. RILEM Tech. Lett. 2019, 4, 89–102.
18. Thankam, G.L.; Renganathan, N.T. *Ideal supplementary cementing material-Metakaolin: A review*. Int. Rev. Appl. Sci. Eng. 2020, 11, 58–65.
19. Borkoev, B.M. *Osobennosti fazovogo sostava i strukturno-fazovye prevrashcheniya pri obzhige keramicheskogo syrya Kyrgyzskoy Respubliki*. Vestnik KGUSTA, 2016, №2(52), s.139-144.
20. Dzhenchuraev, D.D., Dzhenchuraeva, A.V. *Georesursy nemetallorudnogo syrya Tyan-Shanya i ikh ratsionalnoe ispolzovanie*. Izdatelstvo KRSU, Bishkek, 2021 g., 370 str., UDK: 553.6 (235.216), ISBN: 978-9967-19-809-8-11.4.
21. Hanein, T., Thienel, K.C., Zunino, F. et al. *Clay calcination technology: state-of-the-art review by the RILEM TC 282-CCL*. Mater Struct 55, 3 (2022). [https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-](https://doi.org/10.1617/s11527-021-01807-0)
22. Maymekov, Z.K. i dr. *Fiziko-khimicheskie i termodinamicheskie kharakteristiki kaolinovoy gliny Choko-Bulakskogo mestorozhdeniya pri razlichnykh temperaturakh ee destruktzii*. Izvestiya NAN KR, 2023, №7, s.32-38.

Сведения об авторах:

Джусупова М. А. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Производство, эксплуатация строительных материалов и конструкций» Кыргызского государственного технического университета им.И.Раззакова, проспект Чынгыза Айтматова, 66, 720044, Бишкек, Кыргызстан

Қожахмет М. С. – Старший преподаватель Евразийского Национального университета им. Л.Н. Гумилева, ул. Сатпаева 2, 010008, Астана, Казахстан

Кульшикова С.Т. – автор для корреспонденции, доктор PhD, зав.кафедрой «Технологические машины и строительство» Жезказганского университета имени О.А. Байконурова, пр.Алашахана 1Б, 100600, Жезказган, Казахстан

Dzhusupova M. A. – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department "Production, Operation of Building Materials and Structures" of the Kyrgyz State Technical University named after I. Razzakov, 66 Chyngyz Aitmatov Avenue, 720044, Bishkek, Kyrgyzstan

Kozhakhmet M. S. – Senior Lecturer, L.N. Gumilyov Eurasian National University, 2 Satpayev St., 010008, Astana, Kazakhstan

Kulshikova S. T. – corresponding author, PhD, Head of the Department of Technological Machines and Construction at the O.A. Baikonurov Zhezkazgan University, 1B Alashakhan Ave., 100600, Zhezkazgan, Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license