

УДК: 691.54

DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.6

EDN: FILRWX



Влияние термообработки и тонкости помола на реакционную способность монтмориллонитовых глин

И.Р. Сабиров¹, Н.Р. Рахимова¹, В.П. Морозов², А.А. Ескин², Е.Ю. Ермилова¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет,

²Казанский Федеральный Университет

Казань, Российская Федерация

Аннотация. *Постановка задачи.* Согласно общемировым трендам современного развития цементной промышленности, одним из главных способов снижения объемов производства и применения портландцементного клинкера является введение в состав портландцементов активных минеральных добавок и (или) минеральных наполнителей. Это привело к необходимости расширения сырьевой базы последних на принципах распространенности и повсеместной доступности и необходимости разработки теории и технологии новых разновидностей клинкерозамещающих материалов. *Цель работы* - исследование возможности использования монтмориллонитовых глин различного химико-минералогического и гранулометрического состава в качестве активных минеральных добавок к портландцементу. *Задачи:* исследования структурных изменений методами рентгенофазового и термического анализа монтмориллонитовых глин при термической активации; изучение особенностей влияния химико-минералогического состава и гранулометрического состава исходных и термоактивированных монтмориллонитовых глин на их пуццолановую активность, свойства портландцементного теста и камня.

Результаты. Реакционная способность монтмориллонитовых глин зависит не столько от содержания монтмориллонита, сколько от Al_2O_3 в исходной глине, и возрастает после термической активации, с увеличением удельной поверхности. Содержание монтмориллонита не коррелирует с содержанием Al_2O_3 в глине. Повышение реакционной способности монтмориллонитовых глин при термической обработке происходит в результате снижения степени кристаллизации глинистых минералов, частичного разрушения их структуры, образования аморфного SiO_2 и реакционноспособного Al_2O_3 . Уменьшение размера частиц термообработанных монтмориллонитовых глин с $d_{90} = 59$ мкм до $d_{90} = 50$ мкм повышает их реакционную способность 555-642 до 649-751 СаО мг/г в зависимости от состава глины, прочностные характеристики камня смешанного портландцемента и долю клинкерозамещения.

Выводы. Установлена пригодность термоактивированных монтмориллонитовых глин с содержанием глинистых минералов 49-70% и d_{90} 50-60 мкм для получения активных минеральных добавок со средней пуццолановой активностью 555-751 СаО мг/г. Показана возможность эффективной замены до 10% портландцемента термоактивированными монтмориллонитовыми глинами в составе смешанного портландцемента при твердении в нормально-влажностных условиях.

Ключевые слова: глина, монтмориллонит, каолинит, портландцемент, активность

Для цитирования. Сабиров И.Р., Рахимова Н.Р., Морозов В.П., Ескин А.А., Ермилова Е.Ю. Влияние термообработки и тонкости помола на реакционную способность монтмориллонитовых глин// Известия КГАСУ, 2026, № 1 (75), с. 64-75, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.6, EDN: FILRWX

The effect of thermal activation and grinding fineness on the reactivity of montmorillonite clays

I.R. Sabirov ¹, N.R. Rakhimova ¹, V.P. Morozov ², A.A. Eskin ², E.Yu. Ermilova ¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering

²Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

Abstract. *Problem statement.* In line with global trends in the modern development of the cement industry, one of the main ways to reduce the production and use of Portland cement clinker is the introduction of active mineral additives and/or mineral fillers into Portland cements. This has led to the need to expand the raw material base of the latter based on principles of prevalence and widespread availability, as well as the necessity to develop the theory and technology of new types of clinker-replacing materials. *The aim* of this work is to investigate the possibility of using montmorillonite clays of varying chemical-mineralogical and particle size composition as active mineral additives to Portland cement. *Tasks:* to study structural changes of montmorillonite clays during thermal activation using X-ray phase and thermal analysis methods; to investigate the influence of the chemical-mineralogical composition and particle size distribution of both raw and thermally activated montmorillonite clays on their pozzolanic activity, as well as on the properties of Portland cement fresh and hardened pastes. *Results.* The reactivity of montmorillonite clays depends not so much on the montmorillonite content as on the Al_2O_3 content in the raw clay, and increases after thermal activation with an increase in specific surface area. The montmorillonite content does not correlate with the Al_2O_3 content in the clay. The increase in reactivity of montmorillonite clays during thermal treatment occurs as a result of a decrease in the degree of crystallinity of clay minerals, partial destruction of their structure, and the formation of amorphous SiO_2 and reactive Al_2O_3 . Reducing the particle size of thermally treated montmorillonite clays from $d_{90} = 59 \mu m$ to $d_{90} = 50 \mu m$ increases their reactivity from 555–642 to 649–751 mg CaO/g, depending on the clay composition, as well as improving the strength characteristics of the mixed Portland cement hardened paste and the clinker replacement rate. *Conclusions.* The suitability of thermally activated montmorillonite clays with a clay mineral content of 49–70% and a particle size d_{90} of 50–60 μm for producing active mineral additives with an average pozzolanic activity of 555–751 mg CaO/g has been established. The possibility of effectively replacing up to 10% of Portland cement with thermally activated montmorillonite clays in blended binders under normal moisture curing conditions is demonstrated.

Keywords: clay, montmorillonite, kaolinite, Portland cement, activity

For citation. Sabirov I.R., Rakhimova N.R., Morozov V.P., Eskin A.A., Ermilova E.Yu. The effect of thermal activation and grinding fineness on the reactivity of montmorillonite clays// News of KSUAE, 2026, № 1 (75), p. 64-75, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/75.6, EDN: FILRWX

1. Введение

Расширение номенклатуры, повышение сырьевого разнообразия, разработка распространенных и доступных разновидностей минеральных добавок с учетом региональных геологических условий – актуальное и динамично развивающееся направление устойчивого развития современной цементной промышленности [1-3]. Длительное время основное внимание исследователей и производителей было направлено на ставшие традиционными минеральные добавки – доменный гранулированный шлак, золу теплоэлектростанций, микрокремнезем и др. [4-6]. Однако в связи с ограниченной доступностью и запасами, а также изменениями в стратегиях развития металлургической и топливно-энергетической отраслей промышленности, повсеместное производство смешанных портландцементов с этими материалами ограничено [7,8].

В результате поиска альтернативных минеральных ресурсов, глины с их распространенностью и огромными запасами, а в активированном состоянии имеющие высокую реакционную способность, стали важной и развивающейся частью

номенклатуры минеральных добавок к вяжущим веществам [9-11]. В то же время, потенциал каолиновых глин на основе или с преобладающим содержанием породообразующего минерала со структурным типом 1:1 хорошо исследован и термоактивированные каолиновые глины в форме метакаолина находят применение в технологии цементов и бетонов [12,13]. Монтмориллонитовые глины, сложенные породообразующим минералом со структурным типом 2:1, гораздо более широко распространены в северном полушарии по сравнению с каолиновыми. Исследования их сырьевой ценности и потенциальной пригодности как реакционноспособных алюмосиликатов для низкоуглеродных цементов, в последние годы значительно расширились. Рядом исследований установлено положительное влияние монтмориллонитовых глин как в исходном, так и активированном состоянии, на свойства портландцементных растворов и бетонов. Введение неактивированных глин в состав портландцементов в количестве до 25%, склонных в исходном состоянии к набуханию, как правило, приводит к уменьшению проницаемости, но и снижению подвижности, водоотделения, тепловыделения, увеличению водопотребности, сроков схватывания цементного теста, растворных и бетонных смесей [14,15]. Рядом исследователей был установлен упрочняющий эффект от введения до 15% неактивированного бентонита, проявляющийся как в результате повышения плотности, нуклеаторном эффекте, так и образовании дополнительных продуктов реакции в виде гидро- силикатов и алюмосиликатов кальция как результата взаимодействия реакционноспособных алюмосиликатов с портландитом продуктов реакции [16-18].

Следует отметить существенное увеличение числа исследований, связанных с повышением реакционной способности монтмориллонитовых глин путем модификации или активации различными способами. В работах [19,20] показана возможность повышения 7- и 28-суточной прочности цементных композитов на 7-25% при замещении портландцемента на 3-30% термически активированными монтмориллонитовыми глинами с частицами микрометрового размера. Вместе с тем, по данным, приведенным в [21,22], добавки 15-30% термоактивированных монтмориллонитовых глин снижают раннюю и 28-суточную прочность цементных растворов и бетонов, но к 56-90 суточному возрасту прочность составов на смешанных цементах не отличается от прочности бездобавочных. Снижение теплоты гидратации бетонов на основе портландцемента с добавками монтмориллонитовых глин позволило рекомендовать их для изготовления массивных конструкций и при изготовлении бетонных конструкций в регионах с жарким климатом [22]. Кроме этого, пониженная на 50% по сравнению с метакаолином способность модифицированных монтмориллонитовых глин связывать портландит, способствует сохранению пассивного слоя на поверхности арматуры [23,24]. Добавки 30% модифицированных монтмориллонитовых глин повышают коррозионную стойкость по отношению к хлоридам и сульфатам, но снижают морозостойкость и повышают скорость карбонизации цементных композитов [20]. Не все из опубликованных результатов исследований, в которых использованы монтмориллонитовые глины как в исходном, так и активированном состоянии, согласуются в части положительного влияния или уровня улучшения показателей по причинам не установленного количественного минерального и гранулометрического состава использованных глин. Кроме этого, в большей части исследований не учитывается, что пуццолановая активность - функция, зависящая от ряда параметров, включающих химико-минералогический состав, способ и режим активации, удельная поверхность и другие.

Целью настоящей работы явилось исследование влияния активации и размера частиц на реакционную способность монтмориллонитовых глин различного химико-минералогического состава как активных минеральных добавок к портландцементу. Задачи исследования: анализ структурных изменений монтмориллонитовых глин при термической активации методами рентгенофазового и термического анализа; изучение особенностей влияния химико-минералогического состава и гранулометрического состава исходных и термоактивированных монтмориллонитовых глин на их пуццолановую активность, свойства портландцементного теста и камня.

2. Материалы и методы

Для проведения исследования использовались глины Биклянского (МГ-1) (Республика Татарстан) и Таганского (МГ-3) (Казахстан) месторождений. Химический и минеральный состав глин представлен в таблицах 1 и 2. Химический состав материалов определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии на приборе OPTIMA 4300 DV. Минеральный состав исходных материалов и термоактивированных глин определялся методами рентгенофазового анализа (РФА) с использованием DIFFRAC plus Evaluation Package – EVAsearch/Match, термогравиметрического анализа (ТГ-ДТГ) с использованием STA 443 F3 Jupiter simultaneous thermal analysis apparatus. Минеральный состав портландцемента: C_3S – 72.0 %, C_2S – 9.8 %, C_3A – 5.0 %, C_4AF – 11.4 %.

Таблица 1

Химический состав исходных материалов (%)

Материал	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
Портландцемент	20.7	4.5	3.5	65.0	3.1
МГ-1	50.9	20.73	7.6	0.84	2.09
МГ-2	56.92	16.4	4.71	0.93	2.97

Таблица 2

Минеральный состав глин

Минерал	Формула	МГ-1	МГ-2
Монтмориллонит	(Na,Ca) _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ •H ₂ O	15	21
Монтмориллонит	Na _{0.3} (Al,Mg) ₂ Si ₄ O ₁₀ OH ₂ •6(OH) ₂	21	50
Каолинит	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	13	-
Кварц	SiO ₂	22	15
Кальцит	CaCO ₃	-	-
Альбит	NaAlSi ₃ O ₈	7	2
Микроклин	(K _{0.95} Na _{0.05})•AlSi ₃ O ₈	8	3
Тридимит	SiO ₂	-	5
Кристаллит	SiO ₂	-	1
Мусковит	K _{0.77} Al _{1.93} (Al _{0.5} Si _{3.5})O ₁₀ •(OH) ₂	10	3
Хлорит	(Mg _{2.96} Fe _{1.55} Fe _{0.136} Al _{1.275})•(Si _{2.622} Al _{0.376} O ₁₀)•(OH) ₈	4	-

Ранее проведенными исследованиями установлены оптимальные температура (800°C) и продолжительность (1 ч) обжига монтмориллонитовых глин [25], поэтому термическую активацию проводили при указанных параметрах с последующим помолотом до удельной поверхности 6000 и 10 000 см²/г. Исходные и термообработанные глины изображены на рис.1. По результатам многочисленных исследований установлено, что максимальная реакционная способность термоактивированных глин соответствует размеру частиц менее 45 мкм. Например, товарный метакаолин ВМК-45, выпускаемый ООО «Синерго», имеет удельную поверхность 17 000 см²/г, а d₉₀ (показатель гранулометрического состава, обозначающий размер частиц, соответствующий 90-му процентилу в интегральной кривой распределения частиц по размерам) - 45 мкм. Для получения пробы, близкой к указанному размеру частиц, глины просеивались через сито №0.05 мм. Обозначения глин с соответствующими им показателями удельной поверхности и d₉₀, использованных в исследовании, приведены в таблице 3. Удельная поверхность Гранулометрический состав исходных материалов определялся с помощью лазерного анализатора частиц Horiba La-950V2.

Водопотребность теста портландцемента и портландцемента с добавками глин определялись на тесте нормальной густоты на приборе Вика. Реакционная способность глин оценивалась по влиянию добавок глин на прочность портландцементного камня и пуццолановой активности. Прочность при сжатии образцов определялась испытанием образцов камня размером 2х2х2 см в возрасте 2 и 28 сут нормально-влажностного твердения, изготовленных из теста нормальной густоты. Пуццолановую активность определялась по ГОСТР 59536-2021 «Метакаолин для бетонов и строительных растворов».



Рис.1. Фото глин до и после обжига (иллюстрация авторов)
Fig.1. Photo of clays before and after firing (illustration by the authors)

Таблица 3

Обозначения глин в зависимости от обработки, удельной поверхности и d₉₀

Обозначение	Термообработка	d ₉₀ (мкм)	Удельная поверхность (см ² /г)
МГ-1	-		9864
ТМГ-1(1)	+	64.9	6641
ТМГ-1(2)	+	58.9	10293
ТМГ-1(3)	+	50	-
ТМГ-2(1)	+	101.5	6378
ТМГ-2(2)	+	58.9	9349
ТМГ-3(3)	+	50	-

3. Результаты и обсуждение

2.1. Влияние термообработки на состав монтмориллонитовых глин

На рис.2. приведены дифрактограммы исходных и термоактивированных глин. Термическая обработка глин привела к снижению содержания кристаллической фазы глин, что связано со структурными изменениями каолинита, монтмориллонита и мусковита. На дифрактограмме термообработанной глины ТМГ-1 каолинит не идентифицируется, что свидетельствует о его аморфизации. Монтмориллонит трансформируется в безводную форму $\text{Na-Mg-Al-Si}_4\text{O}_{10}$, а интенсивность его пиков снижается. Эти результаты согласуются с ранее полученными результатами, согласно которым оптимальная температура активации не обязательно совпадает с полной аморфизацией монтмориллонита, так как дегидроокислирование глинистых минералов структурного типа 2:1 к разрушению слоев по кристаллографической оси с, тогда как вдоль кристаллографической оси b изменений не происходит [26-28]. Отражения, соответствующие кальциту, тридимиту, кристобалиту, псевдоволластониту, и хлориту не обнаруживаются при РФА термообработанных глин, что свидетельствует об их разложении. Отражения реликтового кварца остаются неизменными. С учетом того, что содержание кварца в МГ-1 и МГ-2 составляет 22 и 15% и может повлиять на состав пробы после просеивания через сито 0.05 мкм, был проведен анализ этих проб, который показал, что минеральный состав глин не изменился (рис.2).

На кривых ДТА исходных и термообработанных глин идентифицируются два эндотермических пика с наибольшими потерями масс в соответствующих температурных диапазонах. Первый пик при температурах 30-140°C соответствует потере адсорбированной и межслоевой воды глинистых минералов, а второй - при 425-800°C – потере структурных гидроксильных групп в каолините и монтмориллоните. Общие потери масс после термической обработки глины 1 и 2 составили 2.37 и 2.50%, тогда как степень дегидроокислирования 0.97 и 0.98, соответственно.

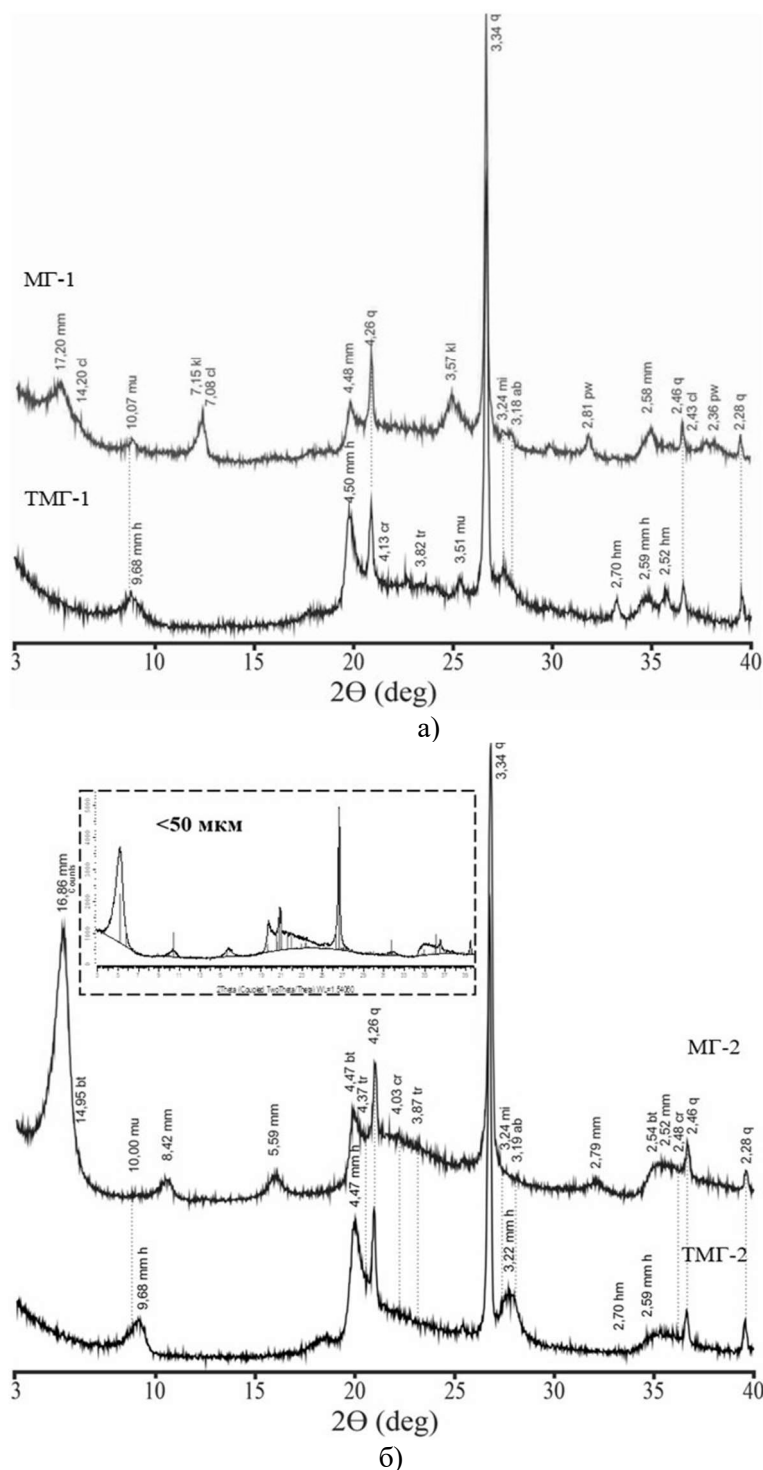


Рис.2. Дифрактограммы исходных (а), термоактивированных глин (б,в)
 (Mm – монтмориллонит, Q – кварц, Ca – кальцит, Ab – альбит, Mi – микролин, Tr – тридимит, Cr – кристобалит, Mu – мусковит, Pw – псевдоволластонит, Cl – хлорит, Kl – каолинит)
 (иллюстрация авторов)

Fig. 2. Diffractograms of raw and thermally activated clays
 (Mm – montmorillonite, Q – quartz, Ca – calcite, Ab – albite, Mi – microcline, Tr – tridymite, Cr – cristobalite, Mu – muscovite, Pw – pseudowollastonite, Cl – chlorite, Kl – kaolinite)
 (illustration by the authors)

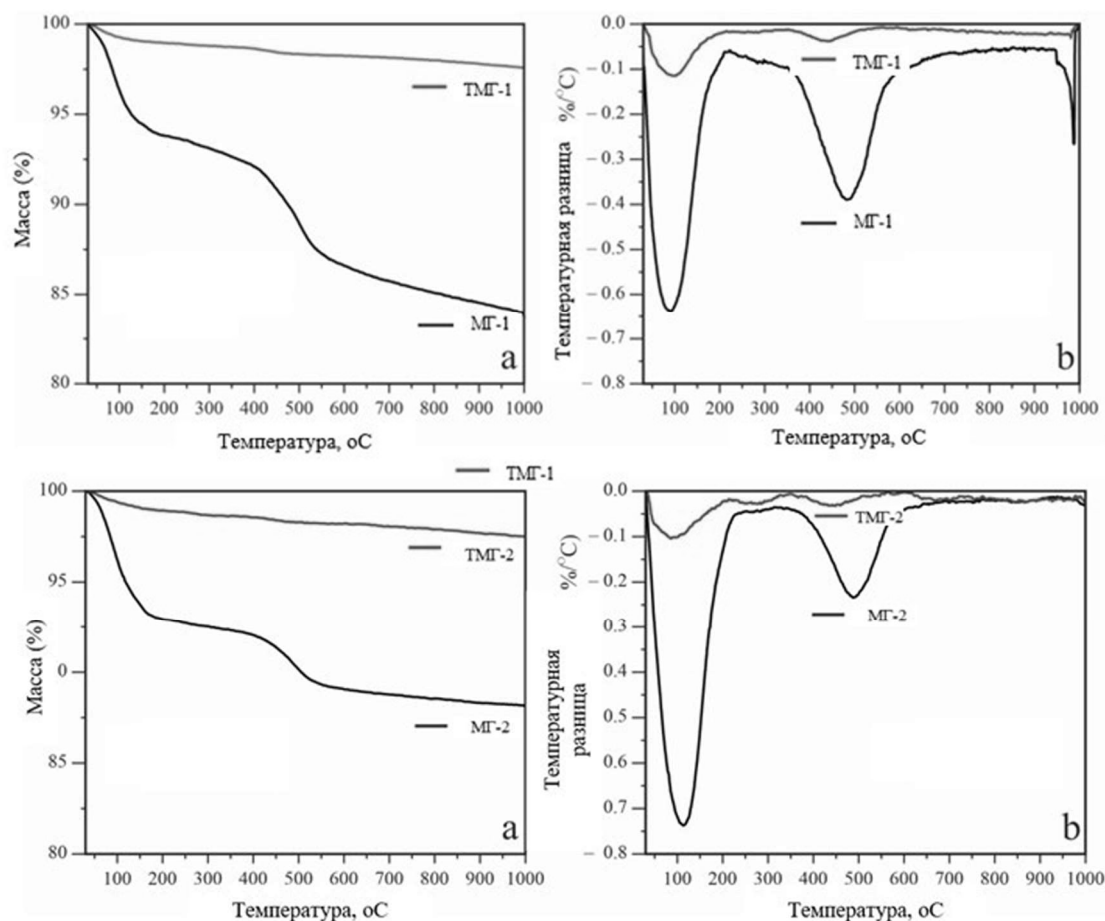


Рис.3. Результаты термического анализа исходных и термоактивированных глин
(иллюстрация авторов)

Fig. 3. Results of thermal analysis of raw and thermally activated clays (illustration by the authors)

2.2. Влияние глин в исходном и термоактивированном состоянии на свойства портландцементного теста и камня

На рис.4 и 5 представлены результаты исследования влияния монтмориллонитовых глин в исходном и термоактивированном состоянии на свойства портландцементного теста и камня. Как видно из приведенных данных, водопотребность портландцементного теста возрастает с увеличением содержания добавок глин. Однако, мера увеличения нормальной плотности зависит от состояния глин, их удельной поверхности, процентного содержания глин и монтмориллонита в них. Так, введение неактивированной глины МГ-1 в количестве до 20% приводит к увеличению нормальной плотности портландцементного теста с 27,5 до 37%, тогда как с добавками термоактивированных ТМГ-1 и ТМГ-2 водопотребность возрастает с 27,5 до 34%. При контакте бентонитов с водой происходит набухание и увеличение объема, обусловленное впитыванием воды кристаллической решеткой минералов, образование кристаллогидратов и гидратации обменных оснований. Причем влага набухания тем выше, чем выше обменная емкость бентонита. Более высокая водопотребность составов с добавками неактивированной глины сравнению с активированной, очевидно, связана с структурными изменениями глинистых минералов при температурной активации, состоящими в частичном разрушении кристаллической решетки, снижения объема впитываемой воды и обменной емкости бентонита. Уменьшение размера частиц и увеличение содержание монтмориллонита закономерно увеличивает водопотребность портландцементного теста.

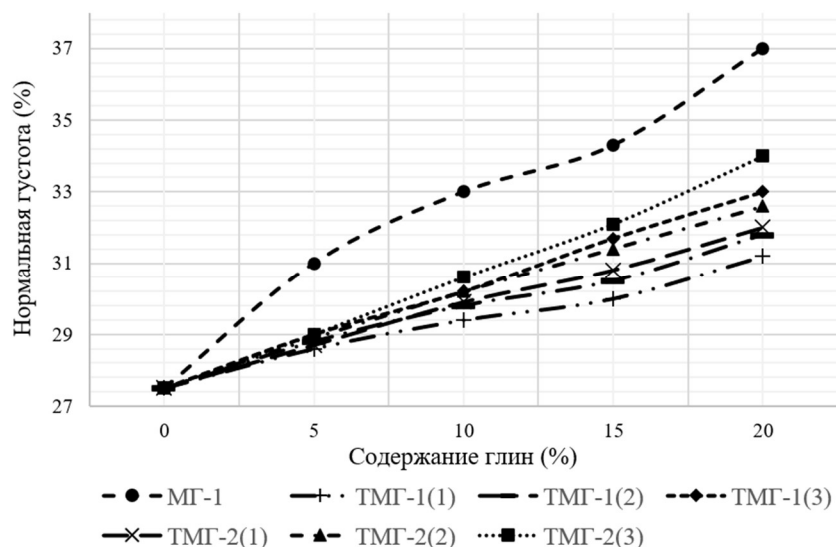


Рис.4. Влияние монтмориллонитовых в исходном и термоактивированном состоянии на нормальную густоту цементного теста (иллюстрация авторов)

Fig. 4. The influence of montmorillonites in raw and thermally activated states on the normal consistency of cement paste (illustration by the authors)

На рис.5 представлены результаты исследования влияния добавок монтмориллонитовых глин на прочность при сжатии портландцементного камня в возрасте 2 и 28 сут.

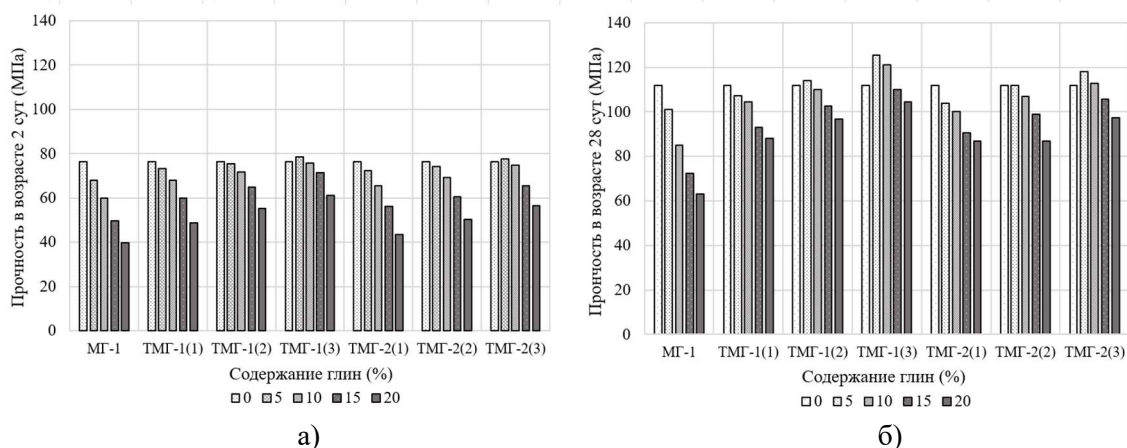


Рис.5. Влияние монтмориллонитовых в исходном и термоактивированном состоянии на прочность при сжатии портландцементного камня в возрасте 2 сут (а), 28 сут (б) (иллюстрация авторов)

Fig. 5. The influence of montmorillonites in their raw and thermally activated states on the compressive strength of hardened Portland cement paste at the age of 2 days (a) and 28 days (b) (illustration by the authors)

Из представленных данных следует, что положительное влияние добавок монтмориллонитовых глин на прочностные характеристики камня смешанного портландцемента уменьшается в ряду ТМГ-1(3)>ТМГ-2(3)>ТМГ-1(2)>ТМГ-2(2)>ТМГ-1(1)>ТМГ-2(1)>МГ-1. Термическая активация значительно повысила реакционную способность монтмориллонитовой глины, что согласуется с данными, опубликованными в работах [19-22]. При введении 5-20% неактивированной глины прочность при сжатии портландцементного камня в возрасте 28 сут снижается на 9-43% относительно контрольного состава, а 5% термоактивированной ТМГ-1 даже при невысокой удельной поверхности не снижает прочностные показатели, а при содержании 10-20% снижает их на 5-21%. Анализ влияния вида глины показал, что ТМГ-1 проявляет большую реакционную способность по сравнению с ТМГ-2, что, очевидно, объясняется большим содержанием Al_2O_3 , который, наряду с SiO_2 , участвует в формировании гидратов кальций-силикатного и кальций-алюмосиликатного состава. При этом, более высокое содержание

Al_2O_3 в глине МГ-1 связано с присутствием в ней каолинита, относящегося к глинистым минералам структурного типа 1:1. Что касается влияния размера частиц, то наибольшее положительное влияние на прочность портландцементного камня показали образцы ТМГ-1(3) и ТМГ-2(3) с размером частиц менее 50 мкм, повышающие как 28-суточную, так и 2-суточную прочность портландцементного камня. При этом увеличение прочности при сжатии портландцементного камня происходит даже при увеличении водопотребности теста при введении добавок с меньшим размером частиц. Однако, увеличение нормальной густоты, в свою очередь, повысит расход пластифицирующих добавок при получении растворов и бетонов на смешанных вяжущих и снизит экономическую целесообразность их использования. Введение термоактивированных монтмориллонитовых глин при меньшей - удельной поверхности 6000-10 000 $см^2/г$ позволяет замещать портландцемент до 10% без снижения прочностных характеристик. Полученные результаты согласуются с результатами определения пуццолановой активности по поглощению CaO , представленные в табл.4 для образцов глин, показавших наибольшую эффективность. Как следует из представленных данных монтмориллонитовые глины по пуццолановой активности могут быть отнесены к активным минеральным добавкам средней активности и уступают по этому показателю промышленному метакаолину, имеющему, как правило 1100-1200 CaO мг/г.

Таблица 4

Пуццолановая активность термоактивированных монтмориллонитовых глин (CaO мг/г)

ТМГ-1(2)	ТМГ-1(3)	ТМГ-2(2)	ТМГ-2(3)
642	751	555	649

4. Заключение

В результате проведенных исследований установлена эффективность использования термоактивированных монтмориллонитовых глин с содержанием глинистых минералов 49-71% для получения активных минеральных добавок средней пуццолановой активности, пригодных для получения смешанных портландцементов. Реакционная способность глин зависит не столько от содержания монтмориллонита в исследованных пределах, сколько от Al_2O_3 в исходной глине, и возрастает после термической активации, с увеличением удельной поверхности. При этом содержание монтмориллонита необязательно коррелирует с содержанием Al_2O_3 в глине. Повышение реакционной способности монтмориллонитовых глин при термической обработке происходит в результате снижения степени кристаллизации глинистых минералов, частичного разрушения их структуры, образования аморфного SiO_2 и реакционноспособного Al_2O_3 . Разделение термообработанных и молотых монтмориллонитовых глин на фракции не меняет их минеральный состав. Уменьшение размера частиц термообработанных монтмориллонитовых глин с $d_{90} - 59$ мкм до $d_{90} - 50$ мкм повышает их реакционную способность 555-642 до 649-751 CaO мг/г в зависимости от вида глины, влияние на прочность и процент замещения портландцемента в смешанных вяжущих. Однако, уменьшение размера частиц добавок негативно сказывается на водопотребности портландцементного теста и увеличит расход водоредуцирующих добавок. Несмотря на меньшую в сравнении с метакаолином пуццолановую активность, термоактивированные монтмориллонитовые глины пригодны для получения смешанных портландцементов.

Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №25-29-00996, <https://rscf.ru/project/25-29-00996>.

Список литературы/References

1. Рахимова Н.Р., Рахимов Р.З. XVI Международный конгресс по химии цемента «Дальнейшая декарбонизация и циркуляционное производство и применение цемента и бетона» // Строительные материалы. 2024. № 1–2. С. 95–99. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-95-99
Rakhimova N.R., Rakhimov R.Z. XVI International Congress on the Chemistry of Cement "Further Decarbonization and Circular Production and Application of Cement

- and Concrete" // Construction Materials. 2024. No. 1–2. P. 95–99. DOI: 10.31659/0585-430X-2024-821-1-2-95-99
2. Schneider M., Hoenig V., Ruppert J. The cement plant of tomorrow // Cement and Concrete Research. 2023. No. 173. 107290. DOI: 10.1016/j.cemconres.2023.107290.
 3. Ahmad M.R., Fernández-Jimenez A., Chen B. Low-carbon cementitious materials: scale-up potential, environmental impact and barriers // Construction and Building Materials. 2024. 455. 139087. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2024.139087.
 4. Степанов С.В., Петропавловских О.К., Копылов М.А. Применение отходов металлургической промышленности в транспортном строительстве // Автомобильные дороги и транспортная инфраструктура. 2024. № 2 (6). С. 29-36. EDN: OXNKGf.
Stepanov S.V., Petropavlovskikh O.K., Kopylov M.A. Application of Metallurgical Industry Waste in Transport Construction // Automobile Roads and Transport Infrastructure. 2024. No. 2 (6). P. 29–36. EDN: OXNKGf.
 5. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А. Влияние пластифицирующих добавок на коррозионную стойкость композиционных портландцементов // Известия КГАСУ, 2025, № 1(71), с. 102-111, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.9, EDN: JGJHVI
Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A. Effect of Plasticizing Additives on the Corrosion Resistance of Composite Portland Cements // News of KSUAE, 2025, No. 1(71), P. 102-111, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/71.9, EDN: JGJHVI
 6. Вдовин Е.А., Строганов В.Ф., Буланов П.Е., Хусаенов Б.К., Загидуллин Э.И. Геополимерное вяжущее на основе отходов сталелитейного производства для дорожного строительства // Известия КГАСУ. 2024. № 4(70). С. 275-284, DOI: 10.48612/News KSUAE/70.24, EDN: STQCKD
Vdovin E.A., Stroganov V.F., Bulanov P.E., Khusaenov B.K., Zagidullin E.I. Geopolymer Binder Based on Steel Production Waste for Road Construction // News of KSUAE. 2024. No. 4(70). P. 275-284, DOI: 10.48612/News KSUAE/70.24, EDN: STQCKD
 7. Абдрахимов В.З. Влияние золошлаковой смеси на технические показатели с использованием регрессивного анализа и фазовый состав керамического кирпича // Известия КГАСУ, 2024, № 2(68), с. 92-104, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.8, EDN: HPPDFF
Abdrakhimov V.Z. Influence of Ash and Slag Mixture on Technical Indicators Using Regression Analysis and Phase Composition of Ceramic Bricks // News of KSUAE, 2024, No. 2(68), P. 92-104, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/68.8, EDN: HPPDFF
 8. Ермилова Е.Ю., Гилязитдинов Р.Ф., Вахитова Р.Р., Хайдаров Р.И. Влияние УФ обработки воды затворения на прочностные свойства портландцементного камня // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 3 (8). С. 40-45.
Ermilova E.Yu., Gilyazitdinov R.F., Vakhitova R.R., Khaydarov R.I. The influence of UV Treatment of Mixing Water on the Strength Properties of Portland Cement Stone // Building Structures, Buildings and Facilities. 2024. No. 3 (8). P. 40-45.
 9. Ермилова Е.Ю., З.А. Камалова. Термоактивированные смеси глины и известняка как комплексные добавки для композиционного портландцемента // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2024. № 4(9). С. 46-53.
Ermilova E.Yu., Z.A. Kamalova. Thermally Activated Mixtures of Clays and Limestone as Complex Additives for Composite Portland Cement // Building Structures, Buildings and Facilities. 2024. No. 4(9). P. 46-53.
 10. Ban Cheah C., Liew J.J., Le Ping Khaw K., Bin Md Akil H., Alengaram U.J. Calcined clay as a low-carbon cementitious material: Comprehensive review of treatment method, properties, and performance in concrete // Cleaner Waste Systems. 2025. 11. 100323. DOI: 10.1016/j.clwas.2025.100323.
 11. Koufany I., Santacruz I., De la Torre A.G., Rodríguez-Ruiz M.D., Aranda M.A.G. Clays for Low-Carbon Cements: Overview, Progress, and Challenges // Global Challenges. 2026. 10(1). e00496. DOI: 10.1002/gch2.202500496.

12. Parashar A., Avet F., Canut M. et al. Industrialisation of calcined clay cements: past, present, and future: a paper of RILEM TC 282-CCCL // *Materials and Structures*. 2024. 57. 211. DOI: 10.1617/s11527-024-02488-7
13. Siddique R., Sidhu A.S., Klemczak B. High strength concrete and the impact of metakaolin on its mechanical, durability and microstructural characteristics – A review // *Journal of Building Engineering*. 2026. V. 118. 114925. DOI: 10.1016/j.jobbe.2025.114925.
14. Zhao H., Ma Y., Zhang J., Hu Z., Li H., Wang Y., Liu J., Li Z. Effect of clay content on plastic shrinkage cracking of cementitious materials // *Construction and Building Materials*. 2022. No. 342. 127989. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127989
15. Rehman S.U., Kiani U.A., Yaqub M., Ali T. Controlling natural resources depletion through montmorillonite replacement for cement-low cost construction // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 232. P. 117188. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117188
16. Li K., Leng Y., Xu L., Zhang J., Liu K., Fan D., Yu R. Rheological characteristics of Ultra-High performance concrete (UHPC) incorporating bentonite // *Construction and Building Materials*. 2022. No. 349. P. 128793. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128793
17. Liu M., Hu Y., Lai Z., Yan T., He X., Wu J., Lv S. Influence of various bentonites on the mechanical properties and impermeability of cement mortars // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 241. P. 118015. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.118015
18. Gedi E., Atmaca A. An experimental study investigating the effects of bentonite clay on mechanical and thermal properties of concrete // *Construction and Building Materials*. 2023. V. 383. 131279. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131279.
19. He C. Thermal stability and pozzolanic activity of raw and calcined mixed-layer mica/smectite // *Applied Clay Science*. 2000. No. 17(3-4). P. 141–161. DOI: 10.1016/S0169-1317(00)00011-9
20. Laidani Z.E.-A., Benabed B., Abousnina R., Gueddouda M.K., Khatib M.J. Potential pozzolanicity of Algerian calcined bentonite used as cement replacement: optimization of calcination temperature and effect on strength of self-compacting mortars // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2020. P. 1–23. DOI: 10.1080/19648189.2020.1713898
21. Penson C. R., Calcined calcium bentonite clay as a partial replacement of Portland cement in mortar, M.S. thesis, Dept. of Civil engineering, University of British Columbia, Okanagan, Canada, 2019.
22. Al-Hammood A.A., Frayyeh Q.J., Abbas W.A. Thermally Activated Bentonite As a Supplementary Cementitious Material – A Review // *Engineering Technology Journal*. 2021. No. 39. P. 206–213. DOI: 10.30684/etj.v39i2A.1733
23. Hollanders S., Adriaens R., Skibsted J., Cizer Ö., Elsen J. Pozzolanic reactivity of pure calcined clays // *Applied Clay Science*. 2016. No. 132–133. P. 552–560. DOI: 10.1016/j.clay.2016.08.003
24. F. Wang, K. Kovler, J. L. Provis, A. Buchwald, M. Cyr, C. Patapy, S. Kamali-Bernard, L. Courard and K. Sideris, “Metakaolin, in: *Properties of Fresh and Hardened Concrete Containing Supplementary Cementitious Materials*, N. De Belie, M. Soutsos, and E. Gruyaert, Ed. Cham, Switzerland: Springer, 2018, P. 153–179.
25. Sabirov, I.R., Rakhimova, N.R., Morozov, V.P., Eskin, A.A. Exploring the potential of calcined montmorillonite-kaolinite clay with medium percentage of clay minerals for low-carbon cements. *Magazine of Civil Engineering*. 2025. 18(5). Article no. 13705. DOI: 10.34910/MCE.137.5
26. Heller-Kallai L. Chapter 7.2 thermally modified clay minerals. In Bergaya F, Theng BKG, Lagaly G, editors. *Developments in clay science*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier; 2006. P. 289–308.
27. Garg N, Skibsted J. Thermal activation of a pure montmorillonite clay and its reactivity in cementitious systems. *J Phys Chem C*. 2014;118(21):11464–11477. DOI:10.1021/jp502529d.

28. Marsh A.T.M., Krishnan S., Bernal S.A. Structural features of thermally or mechano-chemically treated montmorillonite clays as precursors for alkali-activated cements production // Cement and Concrete Research. 2024. 181. 107546. DOI: 10.1016/j.cemconres.2024.107546.

Информация об авторах

Сабиров Ильшат Рафаэлевич, аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: ilshat-sabirov@bk.ru

Рахимова Наиля Равиловна, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: raimova.07@list.ru, ORCID: 0000-0003-1735-1758

Морозов Владимир Петрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Казанский федеральный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: vladimir.morozov@kpfu.ru, ORCID: 0000-0002-9713-2805

Ескин Алексей Александрович, кандидат геолого-минералогических наук, доцент, Казанский федеральный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: eskin.aleksey@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7133-2710

Ермилова Елизавета Юрьевна, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

Email: lizabeta_91@list.ru, ORCID: 0000-0002-8091-4851

Information about the author

Ilshat R. Sabirov, Postgraduate Student, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: ilshat-sabirov@bk.ru

Nailya R. Rakhimova, Doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: raimova.07@list.ru, ORCID: 0000-0003-1735-1758

Vladimir P. Morozov, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

Email: vladimir.morozov@kpfu.ru, ORCID: 0000-0002-9713-2805

Alexey A. Eskin, Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Associate Professor, Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

Email: eskin.aleksey@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7133-2710

Elizaveta Yu. Ermilova, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation

Email: lizabeta_91@list.ru, ORCID: 0000-0002-8091-4851

Дата поступления: 25.02.2026

Дата принятия: 29.04.2026