УДК: 691.33
DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.12
EDN: HJGEVD

Цемент низкой водопотребности как малоклинкерное вяжущее для современных бетонов

Е.Б. Мажитов[1], А.Ю. Беляков[2], Е.Г. Гуляков[2], О.В. Хохряков[2], В.Г. Хозин[2]
[1]Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана»
г. Уральск, Республика Казахстан,
[2]Казанский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация: *Постановка задачи.* Необходимость снижения содержания клинкера в промышленных цементах для уменьшения энергозатрат и выбросов углекислого газа побуждает шире использовать смешанные вяжущие с высоким содержанием замещающих минеральных добавок. При этом их применение связано не только с уменьшением доли дорогостоящего клинкера, но и с необходимостью придания бетонам улучшенных строительно-технических свойств (водонепроницаемости, морозостойкости, трещиностойкости, стойкости к коррозии). Предлагается направление наиболее эффективного использования минеральных добавок путём производства цементов низкой водопотребности, в которых минимизируется доля клинкера, а по технико-экологическим показателям они превосходят не только смешанные вяжущие, но и все общестроительные портландцементы, выпускаемые мировыми производителями. *Целью работы* является сравнительная оценка портландцемента и «карбонатного» цемента низкой водопотребности по составу продуктов гидратации и физико-механическим свойствам в тяжелых бетонах. *Задачи исследования*: сравнение свойств общестроительного портландцемента и «карбонатного» цемента низкой водопотребности; оценка показателей водопотребности бетонных смесей, прочности и клинкероемкости тяжелых бетонов на основе двух типов вяжущих; анализ составов продуктов гидратации цементов с возможностью идентификации образования новых соединений.
Результаты. В работе представлены сравнительные результаты физико-механических испытаний цементного камня и бетонов, приготовленных на основе общестроительного портландцемента и цемента низкой водопотребности с карбонатным наполнителем. Применение ЦНВ-50 позволяет снизить нормальную густоту цементного теста на 23,8 %, водоцементное отношение растворной и бетонной смеси на 40 и 36,8 %, соответственно. Прирост прочности на 28 сут. твердения составил: цементного камня на 39 %, цементно-песчаного раствора на 62 %, тяжелого бетона на 23,5 %. По критерию клинкероёмкости, который определяется отношением содержания клинкера в вяжущем, принятого на 1 м^3 бетона, ЦНВ-50 в 2,3 раза превосходит портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н. Методом рентгенографического фазового анализа выполнена сравнительная оценка состава кристаллогидратов в микроструктуре образцов цементного камня.
Выводы. По показателям водопотребности, прочности и критерию клинкероёмкости «карбонатные» цементы низкой водопотребности превосходят общестроительный цемент. Показано, что при твердении «карбонатного» цемента низкой водопотребности образуются гидрокарбоалюминаты кальция, которые, очевидно, способствуют его раннему интенсивному твердению и повышенной активности в 28-суточном возрасте.

Ключевые слова: клинкероёмкость, эмиссия углекислого газа, цемент низкой водопотребности, смешанные вяжущие, суперпластификатор

Для цитирования: Мажитов Е.Б., Беляков А.Ю., Гуляков Е.Г., Хохряков О.В., Хозин В.Г. Цемент низкой водопотребности как малоклинкерное вяжущее для современных бетонов // Известия КГАСУ, 2025, № 2(72), с. 133-144, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.12, EDN: HJGEVD

Low water demand cement – effective clinker-containing binder for modern concrete

E.B. Mazhitov[1], A.Yu. Belyakov[2], E.G. Gulyakov[2], O.V. Khokhryakov[2], V.G. Khozin[2]
[1]Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University,
Oral, Kazakhstan
[2]Kazan State University of Architecture and Engineering,
Kazan, Russian Federation

Abstract: *Problem statement*. The need to reduce the clinker content in industrial cements to reduce energy costs and carbon dioxide emissions encourages the wider use of mixed binders with a high content of substituting mineral additives. At the same time, their use is associated not only with a decrease in the share of expensive clinker, but also with the need to impart improved construction and technical properties to concrete (water resistance, frost resistance, crack resistance, corrosion resistance). The authors propose a direction for the most effective use of mineral additives by producing low water demand cements, in which the share of clinker is minimized, and in terms of technical and environmental indicators they surpass not only mixed binders, but also all general construction Portland cements produced by global manufacturers. The aim of the study is to conduct a comparative analysis of the efficiency of traditional Portland cement and low water demand "carbonate" cement in terms of composition of hydration products and physical and mechanical properties in heavy concrete. The research objectives are the comparison of properties of general-purpose Portland cement and low water demand "carbonate" cement; assessment of water demand indicators of concrete mixtures, strength and clinker capacity of heavy concretes based on two types of binders; analysis of compositions of cement hydration products with the possibility of identifying the formation of new compounds.
Results. The paper presents comparative results of physical and mechanical tests of cement stone and concrete prepared on the basis of general-purpose Portland cement and low water demand cement (LWC) with carbonate filler. The use of LWC-50 allows reducing the normal density of cement paste by 23.8%, the water-cement ratio of mortar and concrete mixture by 40 and 36.8%, respectively. The increase in strength after 28 days of hardening was the following: cement stone by 39%, cement-sand mortar by 62%, heavy concrete by 23.5%. According to the clinker capacity criterion, which is determined by the ratio of clinker content in the binder accepted per 1 m^3 of concrete, LWC-50 is 2.3 times superior to Portland cement CEM I 42.5 N. The method of X-ray phase analysis was used to comparatively assess the composition of crystalline hydrates in the microstructure of cement stone samples.
Conclusions. In terms of water demand, strength and clinker capacity criteria, "carbonate" low water demand cements are superior to traditional cement. It has been shown that during the hardening of "carbonate" low water demand cement, calcium hydrocarboaluminates are formed, which obviously contribute to its early intensive hardening and increased activity at the age of 28 days.

Keywords: clinker capacity, carbon dioxide emission, low water demand cement, mixed binders, superplasticizer

For citation: Mazhitov E.B., Belyakov A.Yu., Gulyakov E.G., Khokhryakov O.V., Khozin V.G. Low water demand cement – effective clinker-containing binder for modern concrete // News of KSUAE, 2025, № 2(72), p. 133-144, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/72.12, EDN: HJGEVD

1. Введение

Во многих развитых странах производство наиболее востребованного строительного материала – цементного бетона, объемы потребления которого сегодня превысили 10 млрд. $м^3$ в год, идёт по пути снижения клинкероёмкости, повышения прочности и технологичности, а также широкого использования крупнотоннажных промышленных отходов [1–3]. Эта тенденция отвечает современным трендам наилучших

доступных технологий (НДТ) и принципам циркулярной экономики, которые опираются на концепцию устойчивого экологического развития [4–6].

Основным компонентом бетона является портландцемент, производство которого сопровождается высокой эмиссией углекислого газа, большими затратами тепловой и электрической энергии, а также высоким потреблением исчерпаемых нерудных ископаемых (глина, известняк) [7-9]. Энергетическая и экологическая ущербность производства портландцемента (его клинкерной составляющей) привела к введению в мировую практику критерия клинкероёмкости для цемента и бетона [10,11]. На основании этого выделяют следующие факторы, определяющие развитие мировой цементной индустрии в текущий период и перспективе:

1. Минимизация эмиссии углекислого газа, реализуемая через:

а) сокращение содержания клинкера в цементе (снижение клинкероёмкости) за счёт введения минеральных добавок различного типа в процессе помола;

б) уменьшение доли карбонатных компонентов в составе сырьевой смеси (шихты) для производства клинкера.

2. Оптимизация энергопотребления, что обеспечивается:

а) снижением расхода топлива в печах для обжига клинкера (за счёт уменьшения теплоёмкости процесса);

б) сокращением затрат электроэнергии при измельчении сырьевой шихты и, в первую очередь, при помоле цемента.

3. Интеграция вторичных ресурсов – применение промышленных и бытовых отходов в качестве альтернативного топлива при производстве клинкера, а также минеральных добавок для изготовления цемента.

Наиболее распространенным методом снижения клинкероёмкости, который не требует масштабной модернизации предприятий, остаётся совместный помол клинкера с замещающими добавками (гидравлическими, пуццолановыми, инертными). Это позволяет получать многокомпонентные цементы [12-14], чьи технические характеристики регламентированы нормативными документами большинства государств. Но подобные виды цементов оказывают ограниченное влияние на снижение энергопотребления и выбросов CO_2 в расчете на единицу прочности, одновременно характеризуясь повышенным водопотреблением и более низкой активностью в сравнении с чистыми (бездобавочными) вяжущими.

С нашей точки зрения, единственным типом цементов, способным соответствовать возрастающим требованиям по энергопотреблению и воздействию на окружающую среду, являются цементы низкой водопотребности (ЦНВ). Их производство основано на совместном помоле портландцементного клинкера с минеральными наполнителями и суперпластифицирующими добавками [15]. Многолетние исследования ЦНВ, выполненные рядом авторов [16–18], показали, что при содержании 30-70 % клинкера, по технологическим, эксплуатационно-техническим и экологическим показателям превосходят все общестроительные портландцементы, выпускаемые мировыми производителями в Европе, Азии и Америке. Преимущества цементов низкой водопотребности заключаются в следующем:

- схожесть с портландцементом по простоте применения в производстве бетонов и иных материалов;

- позволяют замещать до 90% портландцемента недорогими природными наполнителями или техногенными отходами, сохраняя при этом марочную прочность вяжущего, сопоставимую с традиционными цементами;

- отличаются экологической безопасностью и низким эффектом негативного воздействия на окружающую среду (НВОС), так как технология практически исключает выбросы в атмосферу вредных газов или пылеватых частиц;

- гибкость локализации производства: 1) «карбонатные» ЦНВ могут изготавливаться на стандартных цементных заводах, использующих известняк в качестве сырья, с минимальной модернизацией помольного оборудования; 2) иные типы ЦНВ можно производить на помольных комплексах, размещенных рядом с крупными источниками промышленных отходов подходящего состава;

- универсальность применения: ЦНВ можно использовать не только как малоклинкерное вяжущее для массового строительства, но и адаптировать их для производства специализированных цементных материалов.

Особый интерес могут представлять ЦНВ, приготовленные с использованием наполнителей, среди которых наиболее эффективны карбонатные (известняки, доломиты, доломитизированные известняки и пр.), поскольку они являются наиболее распространенными и дешевыми породами осадочного происхождения в России. С другой стороны, они обладают повышенной размолоспособностью в сравнении с кремнеземистыми наполнителями, что связано с их низкой прочностью и малой твердостью [19]. При этом карбонатные наполнители проявляют химическую активность по отношению к алюминатной фазе цементного клинкера, в результате которой образуются гидрокарбоалюминаты кальция (при невысоких температурах), происходит ускорение гидратации частиц вяжущего и интенсивное упрочнение цементного камня.

Относительно новым технологическим приемом, близким к технологии ЦНВ, который так же состоит в механо- или механохимической активации минеральных компонентов с их эффективным смешением и гомогенизацией, является функционализация [20–22]. Её ключевая особенность заключается в модификации поверхности частиц портландцемента или наполнителя за счёт физической или химической сорбции поверхностно-активных веществ (ПАВ) и снижения поверхностного натяжения воды, что вызывает вовлечение воздуха и пластификацию как цементного теста, так и бетонной смеси [23–25]. Основная функционализация происходит на этапе помола, где взаимодействие добавок ПАВ с минеральными материалами способствует улучшению технологических свойств конечного продукта.

Цель исследования заключается в сравнительной оценке портландцемента и «карбонатного» цемента низкой водопотребности по составу продуктов гидратации и физико-механическим свойствам в тяжелых бетонах. Задачи исследования: сравнение свойств общестроительного портландцемента и «карбонатного» цемента низкой водопотребности; оценка показателей водопотребности бетонных смесей и прочности, клинкероемкости тяжелых бетонов на основе двух типов вяжущих; анализ составов продуктов гидратации цементов с возможностью идентификации образования новых соединений.

2. Материалы и методы

В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ООО «АККЕРМАНН ЦЕМЕНТ» (ГОСТ 31108), минералогический и химический составы, которого представлены в табл. 1 и табл. 2, соответственно. В качестве водоредуцирующей добавки (СП) использовали суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов «Полипласт ПК» (АО «Полипласт»), который соответствует ТУ 20.59.59-098-58042865-2022 и представляет собой белый порошок, содержащий не менее 92 % активного вещества и имеющий насыпную плотность 670 кг/м^3.

Таблица 1

Минералогический состав портландцемента

Наименование	Содержание минералов, %				
	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF	ппп
ЦЕМ I 42,5Н (ООО «Akkermann Цемент»)	60±2	16±1	6,5±1	12±0	5±2

Таблица 2

Химический состав портландцемента

Наименование	Содержание минералов, %								
	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	$CaO_{св}$	Al_2O_3	SO_3	R_2O	ппп
ЦЕМ I 42,5Н (ООО «Akkermann Цемент»)	22,1	65,65	1,28	4,53	0,16	4,67	0,38	0,73	0,5

«Карбонатный» ЦНВ получали по двухстадийной последовательно-раздельной технологии, которая заключается в предварительном измельчении бездобавочного портландцемента с 1% суперпластификатора до удельной поверхности $S_{уд}$ = 4900 см^2/г

(получение ЦНВ-100) и последующим их домолом с карбонатным наполнителем (получение ЦНВ-50). Содержание СП в ЦНВ-50 составило 0,5% от общей массы материала. Для помола использовали вибрационно-шаровую мельницу СВМ-3 с мощностью двигателя 3 кВт и объемом помольной камеры 10 л. Массу навески на помол принимали от 1,5 до 3 кг.

Свойства цементных вяжущих (удельная поверхность, истинная плотность, нормальная густота, сроки схватывания, активность по прочности) определяли согласно действующим стандартам (ГОСТ 310.1…ГОСТ 310.4). Сравнительную оценку водопотребности вяжущих проводили по изменению нормальной густоты и расплыва по мини-конусу цементного теста, а также водоцементного отношения растворной смеси.

Вискозиметр ООО «Полипласт», представляющий собой усеченный мини-конус из нержавеющей стали с нижним основанием Ø40 мм, верхним основанием Ø20 мм и высотой 60 мм Мини-конус до верхнего края заполняли подвижным тестом и плавно поднимали вверх. В течение 30-40 секунд тесто растекалось на горизонтальной поверхности, образуя круг. Далее измеряли диаметры расплыва в двух взаимно перпендикулярных направлениях и находили среднее значение.

Активность по прочности на сжатие цементного камня определяли на образцах размером 2×2×2 см, цементно-песчаного раствора – 4×4×16 см. Все образцы твердели в нормальных условиях при температуре 22±2 °С и влажности не менее 98 %.

В качестве карбонатного наполнителя использовали доломитизированную известняковую муку (минеральный порошок МП-2), полученную из породы Чодраяльского месторождения (Республика Марий Эл, Волжский район, д. Чодраял). Свойства муки (ГОСТ Р 56592, ГОСТ 31108) приведены в табл. 3.

Таблица 3

Свойства карбонатного наполнителя Чодраяльского месторождения

Ед. изм.	Наименование показателей	Ед. изм.	Требуемые значения	Фактические значения
1	Вид материала и степень проявления активности	-	инертный микронаполнитель (ИМД)	инертный микронаполнитель (ИМД)
2	Массовая доля карбоната кальция	%	-	51,5
3	Массовая доля карбоната магния	%	-	42,6
4	Суммарная массовая доля карбоната кальция и магния	%	не менее 80	94,1
5	Зерновой состав (частные остатки) на сите, мм: - 1,25 - 0,63 - 0,315 - 0,16 - 0,09 - 0,05 < 0,05	%	 нет нет не более 0,5 не более 3 не более 5 не более 15 не более 85	 нет нет 0,1 2 3,5 12 82,4
6	Влажность по массе	%	не более 0,2	0,1
7	Истинная плотность	кг/м^3	2700±100	2680
8	Насыпная плотность	кг/м^3	960±50	970
9	Пустотность	%	-	63,8
10	Удельная поверхность	см^2/г	4500±200	4450
11	Наличие металлических включений	%	не более 2	0,1

Приготовление бетонных смесей тяжелого бетона класса В22,5 и определение их свойств (плотность, подвижность, водоцементное отношение) выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 7473-2010. В качестве мелкого заполнителя использовали песок кварцевый обогащенный с наибольшим размером зерна 5 мм и модулем крупности 2,7. Крупный заполнитель представлял собой гравий с размером фракций 5-20 мм и маркой по дробимости 800. Испытание бетонных образцов-кубов с размером ребра 10 см выполняли согласно ГОСТ 10180-2012 на гидравлическом прессе ИП-2500М.

Рентгенографический фазовый анализ цементного камня выполняли на рентгеновском дифрактометре ДРОН-7 (ОАО НПП «Буревестник», г. Санкт-Петербург) с использованием ионизационного метода регистрации интенсивности излучения и рентгеновской трубки 2,5 БСВ 27-Си. Параметры съемки:

- Режим: дискретное сканирование с шагом 1° 2θ;
- Экспозиция в точке: 1 секунда;
- Диапазон углов: 7–70° 2θ;
- Напряжение на трубке: 40 кВ, ток: 20 мА;
- Погрешность определения углов дифракционных максимумов: ±0,02°.

Подготовка образца:

1. Исходный материал — цементный камень, который измельчили в фарфоровой ступке до порошка, проходящего через сито 008.

2. Для исключения карбонизации и загрязнений пробы отбирали из центральной части образцов.

3. Порошок последовательно обрабатывали:

- медицинским спиртом (остановка реакции гидратации);
- ацетоном (удаление свободной воды).

4. Сушка: 30-50 минут при температуре 30-40 °С в условиях лаборатории.

5. Подготовленный порошок запрессовывали в кварцевую дисковую кювету, которая вращалась со скоростью 60 об/мин во время съемки. Режим работы рентгеновской трубки: 40 кВ, 20 мА.

Обработка данных:

- Расчет межплоскостных расстояний выполнялся автоматически в программе EVA (встроенное ПО прибора).
- Идентификация кристаллических фаз проводилась методом сопоставления экспериментальных данных (межплоскостные расстояния, интенсивности пиков) с эталонными рентгенограммами из базы данных. На основе этого анализа определяли фазовый состав материала.

3. Результаты и обсуждение

Первоначально были выполнены сравнительные испытания двух цементных вяжущих (ЦЕМ I 42,5 Н и ЦНВ-50), результаты которых представлены в табл. 4.

Таблица 4

Сравнительные свойства ЦЕМ I 42,5 Н и ЦНВ-50

№ п/п	Наименование показателей	Ед. изм.	Вяжущие вещества	
			ЦЕМ I 42,5 Н	ЦНВ-50
Свойства цементного теста и камня				
1	Нормальная густота (НГ)	%	26,0	19,8
2	Истинная плотность	г/см^3	3,12	2,93
3	Удельная поверхность	см^2/г	4120	5260
4	Снижение НГ	%	-	23,8
5	Сроки схватывания, - начало - конец	ч-мин	 2-55 3-40	 1-30 2-35
6	Водоцементное отношение (В/Ц) цементного теста	-	0,4	0,24
7	Расплыв по мини-конусу	мм	55	55
8	Прочность цементного камня на сжатие на: - 1 сут. - 2 сут. - 7 сут. - 14 сут. - 28 сут.	МПа/ %	 7,5/100 20,4/100 26,8/100 37,5/100 46,2/100	 39,3/524 49,0/240 53,6/200 57,8/154 64,1/139

Окончание таблицы 4

Свойства цементно-песчаного раствора (ГОСТ 310.4)				
9	Водоцементное отношение (В/Ц)	-	0,38	0,27
10	Расплыв конуса	мм	110	110
11	Снижение В/Ц	%	-	40
12	Активность по прочности при сжатии в условиях нормального твердения через: - 1 сут. - 7 сут. - 14 сут. - 28 сут.	МПа	 12,0/100 20,8/100 43,5/100 52,2/100	 19,4/162 37,5/180 53,9/124 61,4/118

Как видно из табл. 4, ЦНВ-50 отличается относительно низкой водопотребностью. При этом её снижение по НГ цементного теста достигает 23,8 %, а по В/Ц растворной смеси – 40 %. Закономерно возросла прочность на сжатие цементного камня (на 39 % в 28 сут твердения) и цементно-песчаного раствора – при его испытании существенней увеличилась ранняя прочность – на 62 % в возрасте одних суток и, в меньшей степени в марочном возрасте – на 18 %.

Составы равноподвижных бетонных смесей и результаты определения свойств тяжелого бетона (класс В22,5) с этими вяжущими представлены в табл. 5 и табл. 6, соответственно. Для сравнительной оценки цементных вяжущих (ЦЕМ I и ЦНВ-50) по клинкероёмкости использован критерий $С_к/R_{сж}$, где $С_к$ – содержание клинкера в вяжущем, расход которого приходился на 1 м^3 бетона, $R_{сж}$ –прочность тяжелого бетона в марочном возрасте.

Таблица 5

Составы тяжелых бетонов, приготовленных на основе ЦЕМ I 42,5Н и ЦНВ-50

№ состава	Вид вяжущего	Расход материалов, кг/м^3				
		вяжущее (содержание клинкера $С_к$)	песок	крупный заполнитель	вода	СП «Полипласт ПК»
1	ЦЕМ I 42,5 Н	330 (325)	902	974	190	1,65 (0,5 % от массы ЦЕМ)
2	ЦНВ-50	330 (160)		1048	120	-

Таблица 6

Свойства тяжелых бетонов, приготовленных на основе ЦЕМ I 42,5Н и ЦНВ-50

№ состава	ОК, см	В/Ц	ΔВ, %	Плотность бетонной смеси, кг/м^3	Прочность бетона на сжатие $R_{сж}$, МПа, в возрасте, сутки					$С_к/R_{сж}$, кг/МПа
					1	3	7	14	28	
1	18	0,57	-	2400	6,9	9,6	13,6	21,4	28,8	11,3
2	18,5	0,36	36,8	2400	8,5	15,2	20,8	27,6	32,4	4,9

Как видно из табл. 6, водопотребность бетонной смеси на ЦНВ-50 оказалась ниже на 70 л (36,8 %), что указывает на необходимость корректировки её состава по выходу путем увеличения расхода заполнителей (ГОСТ 27006). Снижение водопотребности закономерно приводит к росту прочности бетона на сжатие, особенно в раннем возрасте (23,2 % на 1 сутки). В 28-суточном возрасте увеличение прочности бетона относительно ниже (12,5 %). Из сравнения расчетных критериев $С_к/R_{сж}$ обоих вяжущих (11,3 и 4,9 кг/МПа) становится очевидно, что ЦНВ-50 по критерию клинкероёмкости в 2,3 раза эффективнее. Это согласовывается с результатами, полученными в работе [17,18].

Поскольку «карбонатный» ЦНВ гораздо интенсивнее твердеет как в раннем, так и в марочном возрасте, то целесообразно определить состав продуктов гидратации с возможностью идентификации образования новых соединений. На рис. 1 и рис. 2, соответственно, представлены рентгенограммы цементного камня марок ЦЕМ I 42,5 Н и «карбонатного» ЦНВ-50, полученных после 28-суточной гидратации в нормальных условиях, где.

- Ось X: угол дифракции (2θ) в диапазоне 7–70°;
- Ось Y: интенсивность рентгеновского излучения (имп/с).

Цифровые отметки над пиками соответствуют межплоскостным расстояниям (d, Å) кристаллических решёток идентифицированных минеральных фаз. Сравнение положений и интенсивности рефлексов выполнено с использованием эталонных данных из рентгенографических баз.

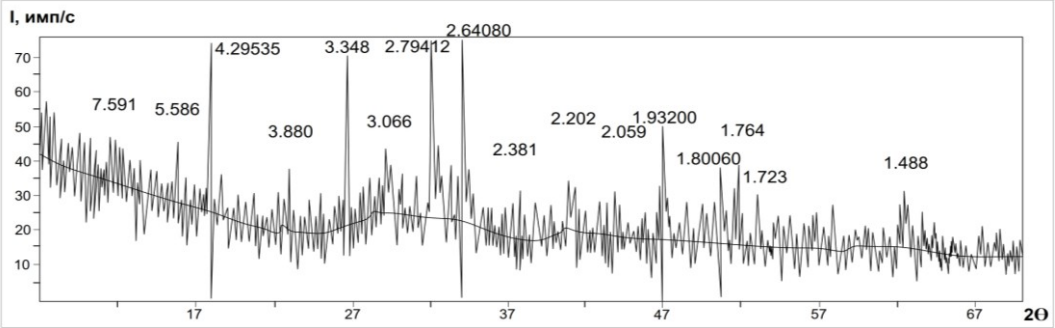

Рис. 1. Рентгенограмма цементного камня ЦЕМ I 42,5 Н (иллюстрация авторов)
Fig. 1. X-ray of cement stone CEM I 42.5 N (illustration by the authors)

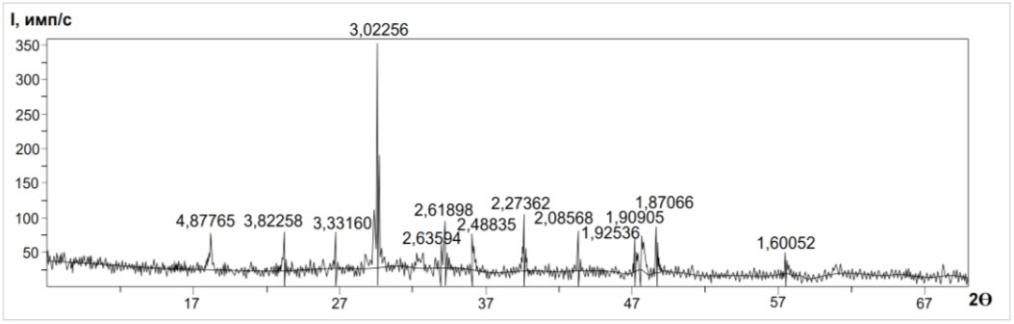

Рис. 2. Рентгенограмма цементного камня «карбонатного» ЦНВ-50 (иллюстрация авторов)
Fig. 2. X-ray image of the cement stone of the “carbonate” LWDC-50 (illustration by the authors)

Из анализа рентгенограммы цементного камня ЦЕМ I 42,5 Н следуют:

- Основные отражения: 4,29; 2,64; 1,93; 1,764; 1,488 Å.
- Отражение 2,79 Å может соответствовать негидратированному алиту (C_3S, 2,776 Å) или β-форме C_2S (2,794; 2,785 Å).
- Высокоугловые области (55–60°): пик 1,800 Å — характерен для фазы C-S-H; пик 1,723 Å — связан с фазой C_3FH_6, близкой по структуре к C_3AH_6.
- Присутствие вторичных фаз: эттрингит (3,880; 2,202 Å) и незначительные пики моносульфатной формы гидросульфоалюмината кальция (ГСАК-1) (2,059 Å).

Анализ рентгенограммы карбонатного ЦНВ-50:

- Характерные фазы: гидрокарбоалюминат кальция $3CaO·Al_2O_3·3CaCO_3·32H_2O$ (ГКАК-3) (3,82; 2,488 Å) и возможное присутствие фазы $3CaO·Al_2O_3·CaCO_3·12H_2O$ (ГКАК-1) (7,59; 1,60 Å) из-за частичного разложения ГКАК-3.
- Спорные отражения: пик 1,60 Å может соответствовать ГСАК-1 или кубическому гидроалюминату кальция (C_3AH_6).
- Отличия от ЦЕМ I 42,5Н:

1) Отсутствие пиков эттрингита, что указывает на взаимодействие алюминатных фаз с $CaCO_3$ с образованием ГКАК-3 и ГКАК-1.

2) Пики $Ca(OH)_2$ (4,877; 2,635; 1,925 Å) схожей интенсивности с ЦЕМ I 42,5Н, но с многоступенчатой формой (2,635–2,619; 1,925–1,909 Å).

Ключевые выводы:

1. Изменение структуры $Ca(OH)_2$ в ЦНВ-50: многоступенчатые пики могут быть следствием влияния органического суперпластификатора на кристаллизацию.
2. Преобладание карбонатных фаз в ЦНВ-50: присутствие ГКАК-3 и ГКАК-1 подтверждает активное связывание CO_3^{2-} в гидратной системе.

4. Заключение

Таким образом, из полученных результатов работы следуют выводы:

1) Проанализированы современные мировые тенденции производства общестроительного портландцемента и показано, что главной их целью является уменьшения энергозатрат и выбросов парниковых газов, в частности CO_2. Для достижения этой цели развитые страны идут по пути применения различных типов смешанных вяжущих с относительно низким содержанием клинкера, поскольку он является основным источником углекислого газа, образующегося при декарбонизации известняка в результате обжига и сжигания больших объемов топлива. Очевидно, что наиболее перспективным вяжущим по критерию клинкероёмкости является цемент низкой водопотребности, который, несмотря на значительное содержание замещающих минеральных добавок (до 70 %), не уступает рядовым портландцементам по технологическим, физико-механическим и эксплуатационным показателям.

2) Сравнительные испытания показывают, что «карбонатный» ЦНВ-50 отличается весьма низкой водопотребностью в сравнении с портландцементом ЦЕМ I 42,5 Н. Снижение по нормальной густоте цементного теста достигает 23,8 %, по водоцементному отношению растворной и бетонной смеси 40 и 36,8 %, соответственно. Закономерно возрастает прочность на сжатие, особенно в раннем возрасте. Прирост прочности на 28 сут твердения составил: цементного камня на 39 %, цементно-песчаного раствора на 62 %, тяжелого бетона на 23,5 %. По критерию клинкероёмкости, который определяется отношением содержания клинкера в вяжущем, принятого на 1 $м^3$ бетона, ЦНВ-50 в 2,3 раза превосходит портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н.

3) С помощью рентгенографического анализа «карбонатного» ЦНВ-50 установлено формирование гидрокарбоалюминатов кальция (ГКАК-3 и ГКАК-1) в цементном камне. Именно эти фазы ответственны за:

- Интенсивное раннее твердение материала;
- Повышенную активность на 28 сутки гидратации при нормальных условиях твердения.

Список литературы/ References

1. Гальцева Н.А., Попов П.В., Котов Д.А., Голотенко Д.С. Вторичное использование отходов промышленности // Инженерный вестник Дона. 2022. Т. 89, № 5. С. 572–581.
   Galtseva N.A., Popov P.V., Kotov D.A., Golotenko D.S. Recycling of industrial waste // Engineering journal of Don. 2022. Vol. 89. No. 5. P. 572–581. EDN: AWIEIG.
2. Latawiec R., Woyciechowski P., Kowalski K. (2018). Sustainable Concrete Performance—CO2-Emission // Environments. No. 5(2). P. 14. DOI: 10.3390/environments5020027.
3. 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.
   Stepanov S.V., Petropavlovskikh O.K., Kopylov M.A. The use of waste from the metallurgical industry in transport construction // Roads and transport infrastructure. 2024. No. 2(6). P. 29-36. EDN: OXNKGF.
4. Клайн Д. Глобальные изменения в производстве цемента в мировом масштабе // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2017. № 1. С. 12–20.
   Kline J. Cement manufacturer changes in the global landscape // ALITinform: Cement. Concrete. Dry mixtures. 2017. No. 1. P. 12–20. EDN: XNOBKH.
5. Рахимов Р.З. Строительный комплекс, экология и минеральные вяжущие вещества // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022. № 2(758). С. 5-15. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-758-2-5-15. EDN COIQVX.
   Rakhimov R.Z. Construction complex, ecology and mineral binders // News of Higher Educational Institutions. Construction. 2022. No. (2). P. 5–15. DOI: 10.32683/0536-1052-2022-758-2-5-15.

6. Гурьева М.А. Теоретические основы концепта циркулярной экономики // Journal of International Economic Affairs. 2019. Т. 9 (3). С. 2311–2336. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990. EDN: APEWGS.
Gureva M.A. Theoretical basis of the concept of circular economy // Journal of International Economic Affairs. 2019. Vol. 9 (3). P. 2311-2336. DOI: 10.18334/eo.9.3.40990. EDN: APEWGS.
7. Чаттерджи А.К. Переход к строительству на основе цемента с низким «углеродным следом»: требования и препятствия // Цемент и его применение. 2018. № 2. С. 54–59.
Chatterjee A.K. Transition to low carbon cement-based construction – imperatives and obstacles // Cement and its applications. 2018. No. 2. P. 54–59. EDN: UVXXGW.
8. Andrew R.M. Global CO_2 emissions from cement production // Earth System Science Data. 2018. Vol. 10 (1). P. 195–217. DOI: 10.5194/essd-10-195-2018.
9. Schneider M. The cement industry on the way to a low-carbon future // Cement and Concrete Research. 2019. Vol. 124 (105792). P. 19. DOI: 10.1016/j.cemconres.2019.105792.
10. Sanytsky M., Kropyvnytska, T., Ivashchyshyn H. Sustainable modified pozzolanic supplementary cementitious materials based on natural zeolite, fly ash and silica fume // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254(1):012004. P. 8. DOI: 10.1088/1755-1315/1254/1/012004.
11. Kropyvnytska T. Rucińska T., Kotiv R. Development of Eco-Efficient Composite Cements with High Early Strength // Proceedings of CEE 2019, Advances in Resource-saving Technologies and Materials in Civil and Environmental Engineering. 2019. P. 211-218 DOI: 10.1007/978-3-030-27011-7_27.
12. Palm S., Müller Chr., Proske T., Rezvani M., Graubner C.-A. Concrete application of clinker-efficient cements // Advances in Cement Research. 2018. Vol. 31(5):1-24. P. 1-24. DOI: 10.1680/jadcr.17.00217.
13. Ruan Yu., Jamil T., Hu Ch., Gautam B., Yu J. Microstructure and mechanical properties of sustainable cementitious materials with ultra-high substitution level of calcined clay and limestone powder // Construction and Building Materials. 2022. Vol. 314(6):125416. P. 8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125416.
14. Samchenko, Svetlana & Nguyen, Doan & Shvetsova, Victoria & Dien, Vu. (2023). Influence of complex additives based on sulfoaluminate cement on the properties of composite binder. E3S Web of Conferences. 403. 10.1051/e3sconf/202340303006.
15. Токарский А.Я., Егоров В.Н., Ганзен Е.В., Кузьмина Т.К., Несветайло В.М. Высокопрочный цемент и его применение при возведении монолитных железобетонных конструкций // Строительное производство. 2023. № 1. С. 60-64. DOI: 10.54950/26585340_2023_1_60. – EDN PRYAFZ.
Tokarskiy A. Ya., Egorov V. N., Ganzen E. V., Kuzmina T. K., Nesvetailo V. M. High-strength cement and its use in the construction of monolithic reinforced concrete structures // Construction production. 2023. No. 1. P. 60-64. DOI: 10.54950/26585340_2023_1_60. EDN: PRYAFZ.
16. Ибрагимов Р.А. Исследование влияния пластификаторов на структурообразование активированного цементного камня методом ИК-спектроскопии // Эксперт: теория и практика. 2022. № 2 (17). С. 39-45. DOI:10.51608/26867818_2022_2_39. EDN: ISBRKX.
Ibragimov R.A. Investigation of the effect of plasticizers on the structure formation of activated cement stone by IR spectroscopy // Expert: theory and practice. 2022. No. 2 (17). P. 39-45. DOI:10.51608/26867818_2022_2_39. EDN: ISBRKX.
17. Гаркави М.С., Артамонов А.В., Колодежная Е.В. Пуршева А.В., Ахметзянова М.А., Худовекова Е.А. Цементы низкой водопотребности центробежно-ударного помола // Строительные материалы. 2019. № 1–2. С. 23–27. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-23-27. EDN: YYFQXB.
Garkavi M.S., Artamonov A.V., Kolodezhnaya E.V., Pursheva A.V., Akhmetzyanova M.A., Khudovekova E.A. Low water requirement cements of centrifugal impact

grinding // Construction Materials. 2019. No. 1-2. P. 23-27. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-23-27. EDN: YYFQXB.

18. Макаренко С.В. Цементы низкой водопотребности как альтернативный вид применяемой в товарном бетоне вяжущей смеси // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 1(44). С. 58–63. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-1-58-63. EDN: TXAEFH.
    Makarenko S.V. Cements with low water demand as an alternative type of binding mixture used in ready-mixed concrete // News of Universities. Investment. Construction. Real estate. 2023. Vol. 13(1). P. 58-63. DOI: 10.21285/2227-2917-2023-1-58-63. EDN: TXAEFH.
19. Тимашев В. В. Избранные труды. Синтез и гидратация вяжущих материалов. АН СССР, Отделение физикохимии и технологии неорганических материалов, Москва: Наука, 1986 – 424 с.
    Timashev V. V. Selected works. Synthesis and hydration of binders. USSR Academy of Sciences, Department of Physical Chemistry and Technology of Inorganic Materials, Moscow: Science, 1986 – 424 p.
20. Гиззатуллин А.Р., Морозова Н.Н., Нестерова К.О. Функционализированные наполнители для применения в цементных бетонах // Полимеры в строительстве научный интернет-журнал. 2023. № 1(11). С. 47–57. EDN: CBGPNV.
    Gizzatullin A.R., Morozova N.N., Nesterova K.O. Functionalized fillers for use in cement concretes // Polymers in construction: scientific internet-journal. 2023. No. 1(11). P. 47-57. EDN: CBGPNV
21. Перцев В.Т., Леденев А.А., Рудаков О.Б. Физико-химические подходы к разработке эффективных органоминеральных добавок для бетона // Конденсированные среды и межфазные границы. 2018. Т. 20. № 3. С. 432–442. DOI: 10.17308/kcmf.2018.20/580. EDN: SIVBCT.
    Pertsev V.T., Ledenev A.A., Rudakov O.B. Physical and chemical approaches to the development of effective organomineral additives for concrete // Condensed matter and interphases. 2018. Vol. 20. No. 3. P. 432-442. DOI: 10.17308/kcmf.2018.20/580. EDN: SIVBCT.
22. Калашников В.И., Мороз М.Н., Тараканов О.В., Калашников Д.В., Суздальцев О.В. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами // Строительные материалы. 2014. № 9. С. 70–75. EDN: SNLKAH.
    Kalashnikov V.I., Moroz M.N., Tarakanov O.V., Kalashnikov D.V., Suzdaltsev O.V. New ideas about the mechanism of action of superplasticizers, jointly ground with cement or mineral rocks // Construction Materials. 2014. No. 9. P. 70–75. EDN: SNLKAH.]
23. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 4(688). С. 30–37. EDN: WEARYR.
    Kalashnikov V.I., Erofeev V.T., Tarakanov O.V. The suspension-filled concrete mixtures for powder-activated concretes of new generation // News of Higher Educational Institutions. Construction. 2016. No. 4(688). P. 30–37. EDN: WEARYR.
24. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В., Дебердеев Т.Р. Влияние пластификаторов на свойства гипсовых вяжущих, активированных в аппаратах вихревого слоя // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. № 3(126). С. 293-300. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.293-300. EDN: EPCPTP.
    Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R. The influence of plasticizers on the properties of gypsum binders activated in vortex layer apparatus // MGSU Bulletin. 2019. Vol. 14. No. 3(126). DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.293-300. EDN: EPCPTP.
25. Ермилова Е.Ю., Камалова З.А. Композиционные портландцементы с комплексными минеральными добавками как решение проблемы утилизации техногенных отходов промышленности // Строительные конструкции, здания и сооружения. 2023. № 2(3). С. 4–10.

Ermilova E.Yu., Kamalova Z.A. Blended Portland cements with complex mineral additives as a solution of the problem of man-made industrial waste utilization // Construction, buildings and structures. 2023. No. 2(3). P. 4-10. EDN: KANWFM

Информация об авторах

Мажитов Еркебулан Бисенгалиевич, кандидат технических наук, доцент, Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана, г. Уральск, Республика Казахстан
Email: mazhitov201090@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6155-4865
Беляков Андрей Юрьевич, заведующий лабораторией, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: belyakoffandrrey@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0017-1419
Гуляков Евгений Геннадьевич, инженер, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: gulyakoveg@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-7065-8022
Хохряков Олег Викторович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: olvik@list.ru, ORCID: 0000-0001-5337-2850
Хозин Вадим Григорьевич, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация
Email: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Information about the authors

Erkebulan B. Mazhitov, candidate of technical sciences, associate professor, Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian Technical University, Oral, Kazakhstan
Email: mazhitov201090@gmail.com, ORCID: 0000-0001-6155-4865
Andrey Yu. Belyakov, head of laboratory, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.
Email: belyakoffandrrey@mail.ru, ORCID: 0000-0003-0017-1419
Evgeny G. Gulyakov, engineer, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.
Email: gulyakoveg@kgasu.ru, ORCID: 0000-0002-7065-8022
Oleg V. Khokhryakov, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.
Email: olvik@list.ru, ORCID: 0000-0001-5337-2850
Vadim G. Khozin, doctor of technical sciences, professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation.
Email: khozin.vadim@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-0874-316X

Дата поступления: 14.03.2025 *Дата принятия: 30.05.2025*