Жаратылыстану және техникалық ғылымдар
Естественные и технические науки
Natural and Technical Sciences

МРНТИ: 67.09.31 https://doi.org/10.65247/3136-8042-2026-3.01

КАРБОНАТНЫЕ ЦЕМЕНТЫ НИЗКОЙ ВОДОПОТРЕБНОСТИ КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ КЛИНКЕРОЕМКОСТИ И УГЛЕРОДНОГО СЛЕДА ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ

*[1]А.М.УРАЗАЛИН, [1]Е.Б.МАЖИТОВ
[1]Западно-Казахстанский аграрно-технический университет имени Жангир хана (Уральск, Казахстан)
*abckaz3341@gmail.com, mazhitov201090@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается подход к снижению клинкероемкости цементных систем за счет применения карбонатных цементов низкой водопотребности. Обоснован выбор кальциевых карбонатных систем по сравнению с магнезиальными вяжущими, ограниченными повышенной водопотребностью и технологическими рисками. На основе анализа выполнен выбор карбонатного цемента низкой водопотребности ЦНВ-50КБ и проведено его сопоставление с традиционным портландцементом ПЦ500Д0. Сравнение выполнено по основным технологическим показателям, включая прочность на различных сроках твердения и сроки схватывания. Показано, что цемент ЦНВ-50КБ обеспечивает сопоставимые технологические и прочностные характеристики при сниженной доле клинкера и пониженной водопотребности. Экологическая оценка, основанная на опубликованных данных, свидетельствует о снижении удельных выбросов диоксида углерода и энергоемкости производства. Полученные результаты подтверждают перспективность карбонатных ЦНВ как эффективной и экологически обоснованной альтернативы портландцементу.
Ключевые слова: карбонатные цементы, цементы низкой водопотребности, снижение клинкероемкости, портландцемент, экологическая эффективность, выбросы CO_2.

Клинкер үлесін және көміртік ізін азайтудың тәсілі ретінде төмен су тұтынатын карбонаттық цементтер

[1]А.М.Уразалин, [1]Е.Б.Мажитов
[1]Жәңгір хан атындағы Батыс Қазақстан аграрлық-техникалық университеті (Орал, Қазақстан)

Аңдатпа. Мақалада цемент жүйелеріндегі клинкер үлесін төмендету мақсатында төмен су тұтынатын карбонаттық цементтерді қолдану тәсілі қарастырылады. Магний негізіндегі тұтқырлармен салыстырғанда кальцийлі карбонаттық жүйелерді таңдаудың технологиялық тұрғыдан негізді екені көрсетіледі, себебі магнезиалды цементтер жоғары су тұтынумен және тұрақтылық мәселелерімен шектеледі. Әдеби деректерді талдау нәтижесінде төмен су тұтынатын карбонаттық цемент ЦНВ-50КБ таңдалып, ол дәстүрлі ПЦ 500 Д0 портландцементімен салыстырылды. Салыстыру беріктік көрсеткіштері мен қату мерзімдерін қоса алғанда негізгі технологиялық параметрлер бойынша жүргізілді. Нәтижелер ЦНВ-50КБ цементінің клинкер үлесі мен су тұтынуы төмен болған жағдайда да портландцементке тән қасиеттерді қамтамасыз ететінін көрсетеді. Экологиялық бағалау көмірқышқыл газының меншікті шығарындылары мен энергия сыйымдылығының төмендегенін дәлелдейді. Алынған нәтижелер карбонаттық төмен су тұтынатын цементтердің дәстүрлі портландцементке тиімді балама екенін растайды.
Түйін сөздер: карбонаттық цементтер, төмен су тұтынатын цементтер, клинкер үлесін азайту, портландцемент, экологиялық тиімділік, CO_2 шығарындылары.

Carbonate low water-demand cements as a strategy for reducing clinker content and carbon footprint of cement systems

[1]A.M.Urazalin, [1]E.B.Mazhitov
[1]Zhangir Khan West Kazakhstan Agrarian and Technical University (Uralsk, Kazakhstan)

Abstract. This paper examines an approach to reducing clinker content in cement systems through the use of carbonate low water-demand system. The selection of calcium-based carbonate systems is justified in comparison with magnesia-based binders, which are limited by high water demand and technological constraints. Based on an analysis, the carbonate low water-demand cement CNV-50KB is selected and compared with conventional Portland cement PC500D0. The comparison focuses on key technological parameters, including strength development at different curing stages and setting times. The results show that CNV-50KB provides mechanical and technological performance comparable to Portland cement while exhibiting reduced water demand and a lower clinker content. An environmental assessment based on published data indicates a reduction in specific CO_2 emissions and production energy intensity. The findings confirm the potential of carbonate low water-demand cements as an effective and environmentally sound alternative to traditional Portland cement.
Keywords: carbonate cements, low water-demand system, clinker reduction, Portland cement, environmental efficiency, CO_2 emissions.

Введение

Цементная промышленность является одним из крупнейших источников антропогенных выбросов CO_2, главным образом за счет производства портландцементного клинкера, которое включает кальцинацию известняка и работу высокотемпературных печей (1450 °C). В ежегодном аналитическом отчете, оценивающем прогресс мирового сообщества в сокращении выбросов парниковых газов и переходе к экологически чистым технологиям, приводятся данные, что на долю цемента приходится около 7% мировых выбросов [Cement and concrete, 2025]. Как отмечает Э.Б.Мусина в своей работе, по данным “Central Pollution Control Board” цементная промышленность входит в число 17 наиболее вредных для окружающей среды производств [Мусина Э.Б., 2023]. Производство цемента в Казахстане достигло исторического рекорда – за первые 11 месяцев 2025 года оно составило 13,07 млн тонн, что превысило предыдущие уровни [Жусупбекова Д., 2026]. Это означает, что цементная промышленность Республики остается крупным сектором экономики, с интенсивным использованием ресурсов и, соответственно, существенным воздействием на окружающую среду. В условиях ужесточения экологических требований и перехода строительной отрасли к принципам устойчивого развития одной из приоритетных задач является снижение клинкероемкости цементных систем при сохранении их технологических и эксплуатационных свойств. В последние годы активно развиваются направления, связанные с применением альтернативных вяжущих и композиционных цементов, включая цементы низкой водопотребности, минерально-модифицированные и карбонатные системы.

Существующие решения остаются фрагментарными и часто ориентированы на оптимизацию отдельных показателей. В ряде случаев экологический эффект достигается за счет ухудшения технологических свойств, тогда как технологические улучшения не сопровождаются количественно обоснованным снижением углеродного следа. Это особенно характерно для ЦНВ и карбонатных систем, которые в большинстве исследований рассматриваются раздельно. В результате отсутствует целостное понимание того, каким образом снижение доли клинкера, тип карбонатной фазы и механизм водопотребности взаимосвязаны в рамках одной цементной системы и как это отражается на ее технологической и экологической эффективности.

Целью настоящей работы является обоснование применения кальциевых карбонатных ЦНВ как эффективного способа снижения клинкероемкости и углеродного следа цементных систем. Для достижения поставленной цели выполнен сравнительный анализ минералов карбонатного цемента и разных типов карбонатного ЦНВ с разным содержанием суперпластификатора, проведено сравнительное сопоставление подходящего типа цемента с портландцементом ПЦ500Д0, а также рассмотрены данные для оценки его экологического рейтинга. Научная значимость работы заключается в формировании комплексного взгляда на карбонатные цементы низкой водопотребности как обоснованную альтернативу традиционным клинкерным вяжущим.

Основная часть

Одним из ключевых показателей экологической эффективности цементных систем является величина удельных выбросов диоксида углерода. На 1 тонну клинкера приходится 0,80-0,90 тонн CO_2, из которых около 60-65% образуется в результате декарбонизации известняка, а 35-40% - вследствие сжигания топлива в печах при высоких температурах [Hargis C.W. et al., 2021]. С учетом того, что содержание клинкера в традиционных портландцементах достигает 95-100%, клинкероемкость остается главным фактором экологической нагрузки [Yestemessov Z.A. et al., 2020]. Снижение доли клинкера на 30-50% позволяет теоретически уменьшить удельные выбросы CO_2 на 250-400 кг/т цемента, однако на практике подобное снижение приводит к потере технологических характеристик [Хозин В.Г. и др., 2021]. В частности, при замещении клинкера минеральными добавками без оптимизации водопотребности, водоцементное отношение увеличивается до 0,40-0,45, что приводит к росту пористости цементного камня и снижению прочности на сжатие на 15-30% в возрасте 28 суток [Scrivener K.L. et al., 2018; Гуляков Е.Г. и др., 2025].

Цементы низкой водопотребности демонстрируют иной механизм формирования структуры. Водоцементное отношение в них снижено до 0,22-0,28, что обеспечивает формирование плотной капиллярно-поровой структуры [Хозин В.Г. и др., 2021]. Экспериментальные данные показывают, что снижение В/Ц на 0,05 приводит к увеличению прочности на сжатие в среднем на 9-12 Мпа и уменьшению объема капиллярных пор более чем на 20% [Powers T.C., 2006]. Выбор типа минеральной добавки также играет ключевую роль. Карбонатные цементы низкой водопотребности в свою очередь делятся на несколько видов отличающихся друг от друга по типу карбонатной фазы, степени замещения клинкера и содержанию химических добавок. Каждая из них обладает разными технологическими свойствами, а некоторые составы по своим характеристикам превосходят портландцемент [Хозин В.Г. и др., 2021].

Несмотря на наличие отдельных данных по типу, реологическим и физико-механическим свойствам, микроструктуре, в большинстве исследований отсутствует интегральная оценка, объединяющая ключевые факторы в рамках одной системы. Это не позволяет в полной мере оценить выбор конкретного типа карбонатного ЦНВ и его потенциал как устойчивой альтернативы портландцементу, обосновывая необходимость сравнительного анализа.

Литературный обзор

Исследованию вопросов снижения клинкероемкости цементов и повышения их экологической эффективности посвящены работы Хозина В.Г., Хохрякова О.В., Сибгатуллина И.Р., Гулякова А.С., Боровского И.В., Зигангирова А.И., Лозовского В.Н., Макаренко С.В., Чубанова А.Н., Лаптева А.А., Hargis C.W., Chen I.A., Devenney M., Fernandez M.J., Gilliam R.J., Thatcher R.P., Jin F., Mingshan Z., Maochun X., Liwu M. и др.

По мнению В.Г.Хозина наиболее перспективным направлением развития цементной индустрии является разработка ЦНВ с пониженной долей клинкера, в том числе с использованием карбонатных компонентов и промышленных отходов. Отдельное внимание уделяется вопросам производства и практического применения, включая совместимость с существующими заводами. Автор подчеркивает, что снижение клинкероемкости при сохранении высокой плотности структуры цементного камня обеспечивает не только высокие эксплуатационные свойства, но и выраженный экологический эффект, связанный с уменьшением потребления природных ресурсов и выбросов углекислого газа [Хозин В.Г. и др., 2021].

В работах Б.М.Лозовского и Е.Г.Гулякова основное внимание уделяется технологическим аспектам цементов низкой водопотребности. В их исследованиях подробнее описываются технологии получения ЦНВ с использованием карбонатных добавок в сочетании с оптимизированным содержанием суперпластификаторов. Показано, что введение этих

компонентов способствует снижению количества воды затворения без ухудшения эксплуатационных характеристик. Вместе с тем экологические эффекты таких цементов рассматриваются в указанных исследованиях преимущественно косвенно, без количественной оценки [Лозовский Б.М.и др., 2021; Гуляков Е.Г. и др., 2025].

Отдельное направление исследований связано с применением карбонатных материалов в цементных системах. Зарубежные авторы рассматривают карбонатные цементы как устойчивую альтернативу портландцементу, способную снижать выбросы CO2 как за счет уменьшения температуры обжига, так и за счет связывания углекислого газа в процессе твердения. Hargis подчеркивает ряд нерешенных вопросов, включая долговечность бетонов на их основе, поведение в армированных конструкциях, реологические свойства и отсутствие нормативной базы. Комплексная оценка технологических и экологических показателей остается недостаточно разработанной [Hargis C.W. et al., 2021].

Ряд исследований посвящен экологической оценке цементов и бетонов в целом, где подчеркивается доминирующая роль клинкероемкости в формировании углеродного следа. Однако в этих работах цементы низкой водопотребности и карбонатные цементы, как правило, анализируются раздельно, что не позволяет в полной мере оценить их совокупный экологический потенциал.

Наиболее близким настоящему исследованию является подход, представленный в работе В.Г.Хозина, рассматривающий карбонатные ЦНВ как целостную систему, в которой снижение клинкероемкости, водопотребности и энергозатрат взаимосвязано [Хозин В.Г. и др., 2021]. В то же время существующие исследования не дают однозначного ответа о преимуществах конкретных типов карбонатных цементов низкой водопотребности по сравнению с традиционным портландцементом, что определяет необходимость дальнейшего комплексного анализа.

Методы

Основными методами, которые применялись в процессе исследования являются теоретико-аналитический и сравнительный методы, направленные на обоснование экологической и технологической эффективности карбонатных цементов низкой водопотребности.

Выбор теоретического подхода обусловлен тем, что ключевые экологические показатели цемента в первую очередь определяются долей клинкера в составе цемента, а также водопотребностью, влияющей на структуру и долговечность цементного камня. Эти параметры достаточно полно представлены в современной научной литературе и могут быть проанализированы без проведения собственных экспериментальных исследований. Целью методологий является систематизация, сопоставление и интерпретация уже существующих результатов для выявления экологического эффекта, возникающего при совместном снижении клинкерного фактора и водопотребности. Анализ выполнен на основе публикаций, посвященных: цементам низкой водопотребности; карбонатным элементам; экологической оценке цементной продукции (таблица 1). В качестве базового уровня для сравнения принят традиционный портландцемент типа CEM I (PC500D0).

Таблица 1

Основные параметры для оценки

Доля клинкера	Водо-цементное отношение	Нормаль-ная густота	Удельная поверх-ность	Прочность на сжатие	Сроки схваты-вания	Удельные выбросы CO2	Экологический рейтинг $К^{Ц}_{CO2}$
CF, %	В/Ц	%	м2/кг	Мпа	Ч-мин	Кг*CO2/ т*ц	Кг*CO2/т*Мпа

Методология работы построена по принципу поэтапного уточнения объекта исследования – от обобщенного класса карбонатных цементов к анализу конкретного состава, обладающего наилучшим сочетанием технологических и экологических характеристик.

На первом этапе проведен аналитический обзор карбонатных цементов как альтернативы портландцементу. В рамках данного этапа рассмотрены основные типы карбонатных вяжущих. На втором этапе выполнено обоснование выбора кальциевой карбонатной фазы в качестве приоритетной по сравнению с магнезиальными цементами. Сопоставление проведено на основе анализа водопотребности, стабильности объема, усадочных деформаций и технологической совместимости с портландцементным клинкером.

Третий этап включал сравнительный анализ различных типов карбонатных цементов низкой водопотребности, отличающихся степенью замещения клинкера и содержанием суперпластификаторов. В качестве критериев отбора использовались водопотребность, сроки схватывания, показатели прочности, содержание клинкера. По совокупности данных в качестве репрезентативного объекта исследования выбран ЦНВ-50КБ с содержанием суперпластификатора С-3 на уровне 4%, обеспечивающий оптимальный баланс между снижением количества клинкера и сохранением технологических свойств.

На четвертом этапе проведено сопоставление выбранного типа цемента с ПЦ500Д0. Сравнение выполнено по ключевым характеристика, включая водопотребность, сроки схватывания, прочность на сжатие в возрасте 1 и 28 суток. Анализ базировался на сопоставлении данных из литературных источников. Заключительный этап был направлен на оценку экологического преимущества карбонатного цемента ЦНВ-50КБ. Анализ был выполнен на основе клинкерного фактора, энергозатрат на производство и способности карбонатной фазы участвовать в связывании CO_2 в процессе твердения. Полученные данные интерпретировались с точки зрения снижения удельных выбросов углекислого газа по сравнению с традиционным портландцементом.

Примененная методология позволила рассмотреть карбонатный цемент низкой водопотребности не как набор отдельных характеристик, а как целостную технико-экологическую систему, в которой выбор минеральной фазы, состав цемента и механизм водопотребности напрямую определяют его эффективность.

Результаты

Анализ литературных данных показывает, что карбонатные ЦНВ представляют собой класс вяжущих, в которых содержание клинкера варьируется в диапазоне 30-70%. В качестве минеральных компонентов используются карбонатные материалы (известняк, доломит), а также доменный гранулированный шлак и промышленные отходы, содержащие карбонат кальция [Хозин В.Г. и др., 2021; Лозовский Б.М. и др., 2021].

Результаты сопоставления кальциевых и магнезиальных карбонатных систем показывают принципиальные различия в их технологических свойствах (таблица 2). Магнезиальные цементы характеризуются повышенной водопотребностью, достигающей 30-35%, а также значительной усадкой и нестабильностью объема, что ограничивает их применение в конструкционных бетонах [Lothenbach B. et al., 2025]. В противоположность этому кальциевые карбонатные системы обладают более низкой водопотребностью, равной 20-22%, стабильными сроками схватывания и высокой совместимостью с портландцементным клинкером [Hargis C.W. et al., 2021].

Таблица 2

Сравнение Ca- и Mg-карбонатных систем

Наименование показателя	Ca-системы	Mg-системы
Водопотребность, %	20-25	30-35
Усадка	Низкая	Повышенная
Стабильность объема	Высокая	Ограниченная
Технологическая совместимость	Высокая	Средняя

Примечание: составлено авторами на основании данных [Lothenbach B., 2025]

Сравнительный анализ различных типов карбонатных ЦНВ показал, что оптимальный баланс между снижением клинкера и сохранением технологических характеристик достигается при содержании клинкера на уровне 50%. При дальнейшем снижении клинкерной составляющей наблюдается уменьшение ранней прочности и замедление процессов твердения [Гуляков Е.Г. и др., 2025]. Энергозатраты на помол ЦНВ и водоцементное отношение при 4% содержании С-3 значительно ниже, чем при 1-3 %. Также ранняя прочность (1 сутки) и марочная прочность (28 сутки) больше при С-3 равном 4%. В этой связи данное содержание СП можно рассматривать как оптимальное [Хозин В.Г. и др., 2021]. Результаты сопоставления карбонатных ЦНВ с 4% С-3, но с различной долей клинкера свидетельствуют о наличии оптимального диапазона составов, обеспечивающий баланс между технологическими и экологическими показателями (таблица 3).

Таблица 3

Сравнительный анализ карбонатных ЦНВ

Наименование показателя	ЦНВ-30	ЦНВ-50	ЦНВ-70
Общие энергозатраты, кВт*ч/кг	0,66	1,17	1,58
Нормальная густота, %	20,3	19,7	20,3
Сроки схватывания, ч-мин - начало - конец	 3-35 5-40	 3-00 3-50	 2-30 3-15
В/Ц	0,28	0,25	0,26
Активность вяжущего в возрасте 1 сут н. тв. при сжатии, Мпа	15,7	39,5	51,3
Активность вяжущего в возрасте 28 сут н. тв. при сжатии, МПа	38,5	75,7	94,1

Примечание: составлено авторами на основании данных [Хозин В.Г., 2021]

Представленные в таблице 3 данные подтверждают литературные выводы о наличии оптимальной дозировки суперпластификаторов, поскольку именно состав ЦНВ-50КБ с содержанием С-3 на уровне 4% демонстрирует наилучшее сочетание технических характеристик. Сводные данные о физико-механических свойствах и реологических характеристиках этого цемента, полученные по результатам анализа профильной научно-технической литературы, представлены в таблице 4 [Хозин В.Г. и др., 2021].

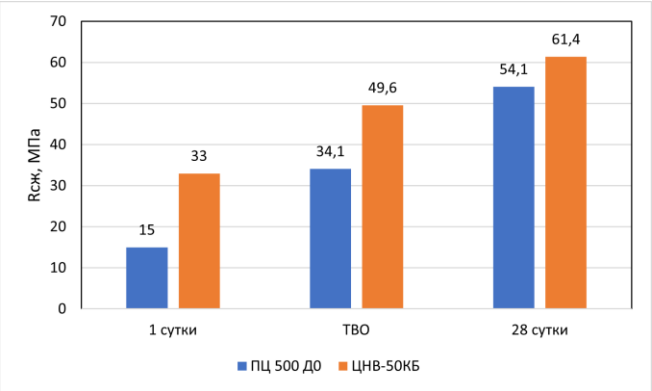
Таблица 4

Свойства карбонатных ЦНВ-50КБ

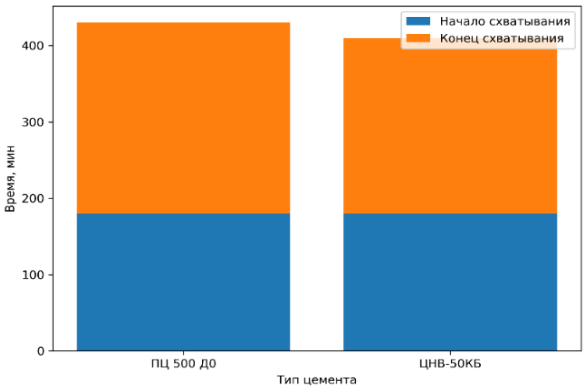
Наименование показателя	Значение показателя, МПа
Удельная поверхность, м2/кг	682
Продолжительность измельчения ПЦ с СП С-3, ч	3,33
Продолжительность домола известняка, ч	0,5
Нормальная густота, %	19,7
Сроки схватывания, ч/мин - начало - конец	 3-00 3-50
В/Ц	0,25
Активность вяжущего в возрасте 1 сут н. тв., Мпа: - при изгибе - при сжатии	 5,9 39,5
Активность вяжущего после пропаривания, Мпа: - при изгибе - при сжатии	 6,5 50,4
Активность вяжущего в возрасте 28 сут н. тв., Мпа: - при изгибе - при сжатии	 7 75,7

Примечание: составлено авторами на основании данных [Хозин В.Г., 2021]

Сравнительная оценка цемента низкой водопотребности ЦНВ-50КБ и портландцемента ПЦ 500 Д0 выполнена по показателям прочности в 1 и 28 сутки, а также при ТВО (рисунок 1а). Сроки схватывания для ЦНВ-50КБ составляют 3:00-3:50, в то время как для портландцемента равны 3:00-4:10 (рисунок 1б), что указывает на отсутствие отрицательного влияния влияния снижения клинкероемкости на технологические параметры [Хозин В.Г. и др., 2021].



а) сравнительная прочность при сжатии



б) сравнительный анализ сроков схватывания

Рисунок 1. Сравнительный анализ вяжущих

Результаты экологической оценки показывают, что определяющим фактором снижения углеродного следа является уменьшение клинкероемкости цементной системы. Как мы отмечали ранее, удельные выбросы CO_2 при производстве портландцементного клинкера находятся в диапазоне 800-900 кг CO_2 на 1 т клинкера, снижение доли клинкера обеспечивает сокращение прямых выбросов углекислого газа на 35-40% [Hargis C.W. et al., 2021]. Также по данным В.Г.Хозина, снижение содержания клинкера до 50% позволяет сократить суммарные удельные энергозатраты на производство цемента на 25-30% [Хозин В.Г. и др., 2021]. Дополнительный эффект обусловлен участием карбонатной фазы в процессах связывания углекислого газа. В процессе твердения цементного камня происходит вторичная карбонизация с образованием карбоната кальция, что позволяет частично компенсировать выбросы CO_2. По данным J.Fei и соавторов, потенциал связывания CO_2 в карбонатных цементных системах может достигать 5-10% от суммарных выбросов [Fei J. et al., 2024].

Экологический рейтинг данного вида цемента в литературных источниках оценивается по методике - $К^{Ц}_{CO2}$, описанная в работе В.Г.Хозина. Согласно этим данным удельные выбросы ЦНВ-50КБ равняется 414 кг*CO_2/т*ц, а общий рейтинг составляет 5,67 кг*CO_2/т Мпа [Хозин В.Г. и др., 2021].

Дискуссия

Полученные результаты позволяют по-новому интерпретировать роль карбонатных цементов низкой водопотребности в контексте современных тенденций развития цементной индустрии. Проведенный анализ показывает, что их нужно рассматривать как самостоятельный класс высокоэффективных цементов с иной логикой формирования свойств.

Выбор кальциевых карбонатов обусловлен их более высокой термодинамической стабильностью в цементной системе, предсказуемым взаимодействием с продуктами гидратации клинкера и отсутствием негативного влияния на технологические свойства. В отличие от магниевых карбонатов, кальцит не вызывает замедления гидратационных процессов и может рассматриваться как функциональный минеральный компонент, а не инертный наполнитель. Водопоглощение у данного типа цемента ниже благодаря более высокой однородности пор.

Результаты сопоставления различных типов карбонатных ЦНВ показали, что оптимизация состава по содержанию клинкера и суперпластификатора является ключевым фактором формирования низкой водопотребности, получением экономической выгоды и сохранением свойств. Более низкое содержание добавки требует больших энергозатрат и при этом, уступает по суточной и марочной прочности на сжатие цементам с 4% СП С-3. Дальнейшее увеличение дозировки может негативно отразиться на реологических свойствах и также становиться экономически невыгодным. Карбонатные ЦНВ с 30% содержанием клинкера значительно уступают по технологическим данным, а ЦНВ-70КБ содержит количество клинкера, требует больших энергозатрат и при этом проигрывает по некоторым свойствам. Выбор ЦНВ-50КБ с 4% суперпластификатором С-3 представляется обоснованным с экономической, технологической и экологической точек зрения.

Сравнение с традиционным бездобавочным портландцементом ПЦ500Д0 позволяет сделать вывод о том, что снижение клинкерного фактора не сопровождается ухудшением ключевых показателей. Сопоставимые значения прочности в различные сроки твердения и близкие интервалы схватывания свидетельствуют о том, что механизмы формирования структуры отличаются, но по эффективности не уступают портландцементам. Это указывает на иной путь достижения требуемых эксплуатационных свойств - не за счет увеличения доли клинкера, а за счет оптимизации микроструктуры и водного режима.

Особое значение имеют результаты, полученные в экологическом аспекте. Снижение доли клинкера напрямую связано с уменьшением удельных выбросов углекислого газа. Дополнительным фактором экологической эффективности является присутствие карбонатного компонента, способного участвовать в процессах связывания CO_2, расширяя потенциал таких цементов в рамках концепции низкоуглеродных и частично карбонизируемых строительных материалов.

Заключение

В работе предложен комплексный подход к оценке цементов низкой водопотребности, позволяющий связать снижение клинкероемкости с сохранением технологических свойств и экологической эффективностью.

Показано, что проблема потери прочностных и реологических характеристик при снижении доли клинкера может быть решена за счет использования кальциевых карбонатных ЦНВ с оптимизированным зерновым составом и пониженной водопотребностью. На основе сравнительного анализа различных типов карбонатных ЦНВ обоснован выбор цемента ЦНВ-50КБ с 4% суперпластификатора С-3 как наиболее сбалансированного по совокупности технологических и экологических показателей.

Установлено, что механизм водопотребности позволяет компенсировать снижение клинкерного фактора и обеспечить формирование плотной структуры цементного камня. Проведено сопоставление технологических характеристик и экологической эффективности карбонатных ЦНВ и традиционного портландцемента ПЦ500Д0, что позволило обосновать их применение как системной альтернативы традиционным цементам.

Данная работа вносит вклад в развитие концепции цементов низкой водопотребности как самостоятельного класса низкоуглеродных вяжущих, объединяя технологические и экологические критерии оценки в единую аналитическую схему. С практической точки зрения результаты могут быть использованы при выборе альтернативных цементов для устойчивого развития строительной отрасли.

Список использованных источников

Cement and concrete (2025) *Breakthrough Agenda* Report [Электронный ресурс]: URL: https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2025/cement-and-concrete (дата обращения: 12.01.2026)

Мусина Э.Б. (2023) Оценка влияния цементной промышленности на загрязнение окружающей среды на примере АО «Карцемент». *Гидрометеорология и экология,* (2), 73-80 [Электронный ресурс]: URL: https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/106/2120 (дата обращения: 04.01.2026).

Жусупбекова Д. (2026) Производства цемента в Казахстане достигло исторического рекорда. *Международное информационное агентство «Казинформ»,* 13 января [Электронный ресурс]: URL: https://www.inform.kz/ru/proizvodstvo-tsementa-v-kazahstane-dostiglo-istoricheskogo-rekorda-fbc207?utm_source (дата обращения: 28.01.26)

Hargis C.W., Chen I.A, Devenney M., Fernandez M.J., Gilliam R.J., Thatcher R.P. (2021) Calcium Carbonate Cement: A Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) *Technique. Materials,* 14, 2709. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14112709 [Электронный ресурс]: URL: https://www.researchgate.net/publication/351799994_Calcium_Carbonate_Cement_A_Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_CCUS_Technique (дата обращения: 11.01.2026).

Yestemessov Z.A., Auezova Y.A., Uralkhanova A.U., Ibraimov D.R., Odintsov D.S., Khaidarov A.M. (2020) Construction and technical properties of PC 500 D0 cement. *ҚазБСҚА Хабаршысы,* 3(77), 129-137. DOI: https://doi.org/10.51488/1680-080X/2020.3-17 [Электронный ресурс]: URL: https://vestnik.kazgasa.kz/frontend/web/uploads/personal-documents/1631175569_X4cPFs.pdf (дата обращения: 11.01.2026).

Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р. (2021) *«Карбонатные» цементы низкой водопотребности.* Москва: АСВ [Электронный ресурс]: URL: https://iasv.ru/karbonatnye-tsementy-nizkoj-vodopotrebnosti.html (дата обращения: 04.01.2026).

Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. (2018) Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO_2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, l.114, 2-26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015 [Электронный ресурс]: URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480 (дата обращения: 24.01.2026).

Гуляков Е.Г., Хозин В.Г., Боровских И.В., Зигангиров А.И. (2025) Высокопрочные цементы низкой водопотребности. *Техника и технология силикатов*, 32(2), 115-127. DOI https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-115-127 [Электронный ресурс]: URL: https://www.naukaru12.ru/ru/nauka/article/97029/view (дата обращения: 11.01.2026).

Powers T.C. (2006) Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society,* 41(1), 1-6. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x [Электронный ресурс]: URL: https://www.researchgate.net/publication/229764587_Structure_and_Physical_Properties_of_Hardened_Portland_Cement_Paste (дата обращения: 24.01.2026).

Лозовский Б.М., Макаренко С.В., Чубанов А.Н., Лаптев А.А. (2021) Исследование по получению цементов низкой водопотребности с использованием карбонатных и кремнеземистых добавок. *Наука, технологии, общество – НТО-2021:* Сборник научных статей по материалам всероссийской научной конференции, 29-31.07.2021, Красноярск: Красноярский краевой Дом науки и техники Российского Союза научных и инженерных общественных объединений, Сибирский научный центр ДНИТ, 69-73 [Электронный ресурс]: URL: https://ruconfdomnit.ru/media/cards/pdfs/%D1%81%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9D%D0%A2%D0%9E-2021.pdf (дата обращения: 11.01.2026).

Lothenbach B., Bernard E., Zhou Z., German A., Montserrat-Torres P., Winnefeld F. (2025) Critical review of the properties of MgO - magnesium carbonate cements. *Cement and Concrete Research,* 200, 108092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108092 [Электронный ресурс]: URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884625003114 (Дата обращения: 11.01.2026).

Fei J., Mingshan Z., Maochun X., Liwu M. (2024) Maximising the benefits of calcium carbonate in sustainable cements: opportunities and challenges associate d with alkaline waste carbonation. *Materials Sustainability,* 2, 1. DOI: https://doi.org/10.1038/s44296-024-00005-z

[Электронный ресурс]: URL: https://www.nature.com/articles/s44296-024-00005-z#Abs1 (дата обращения: 11.01.2026).

References

Cement and concrete (2025) *Breakthrough Agenda Report* [Electronic resource]: URL: https://www.iea.org/reports/breakthrough-agenda-report-2025/cement-and-concrete (date of access: 12.01.2026)

Musina E.B. (2023) Ocenka vliyaniya cementnoj promyshlennosti na zagryaznenie okruzhayushchej sredy na primere AO "Karcement". *Gidrometeorologiya i ekologiya*, (2), 73-80 [Electronic resource]: URL: https://journal.kazhydromet.kz/kazgidro/article/view/106/2120 (date of access: 04.01.2026).

Zhusupbekova D. (2026) Proizvodstva cementa v Kazahstane dostiglo istoricheskogo rekorda. *Mezhdunarodnoe informacionnoe agentstvo "Kazinform",* 13 yanvarya [Electronic resource]: URL: https://www.inform.kz/ru/proizvodstvo-tsementa-v-kazahstane-dostiglo-istoricheskogo-rekorda-fbc207?utm_source=chatgpt.com (date of access: 28.01.26)

Hargis C.W., Chen I.A, Devenney M., Fernandez M.J., Gilliam R.J., Thatcher R.P. (2021) Calcium Carbonate Cement: A Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) *Technique. Materials,* 14, 2709. DOI: https://doi.org/10.3390/ma14112709 [Electronic resource]: URL: https://www.researchgate.net/publication/351799994_Calcium_Carbonate_Cement_A_Carbon_Capture_Utilization_and_Storage_CCUS_Technique (date of access: 11.01.2026).

Yestemessov Z.A., Auezova Y.A., Uralkhanova A.U., Ibraimov D.R., Odintsov D.S., Khaidarov A.M. (2020) Construction and technical properties of PC 500 D0 cement. *ҚazBSҚA Habarshysy,* 3(77), 129-137. DOI: https://doi.org/10.51488/1680-080X/2020.3-17 [Electronic resource]: URL: https://vestnik.kazgasa.kz/frontend/web/uploads/personaldocuments/1631175569_X4cPFs.pdf (date of access: 11.01.2026).

Hozin V.G., Hohryakov O.V., Sibgatullin I.R. (2021) *"Karbonatnye" cementy nizkoj vodopotrebnosti.* Moskva: ASV [Electronic resource]: URL: https://iasv.ru/karbonatnye-tsementy-nizkoj-vodopotrebnosti.html (date of access: 04.01.2026).

Scrivener K.L., John V.M., Gartner E.M. (2018) Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO2 cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research,* l.114, 2-26. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015 [Electronic resource]: URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0008884618301480 (date of access: 24.01.2026).

Gulyakov E.G., Hozin V.G., Borovskih I.V., Zigangirov A.I. (2025) Vysokoprochnye cementy nizkoj vodopotrebnosti. *Tekhnika i tekhnologiya silikatov,* 32(2), 115-127. DOI https://doi.org/10.62980/2076-0655-2025-115-127 [Electronic resource]: URL: https://www.naukaru12.ru/ru/nauka/article/97029/view (date of access: 11.01.2026).

Powers T.C. (2006) Structure and Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste. *Journal of the American Ceramic Society,* 41(1), 1-6. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1958.tb13494.x [Electronic resource]: URL: https://www.researchgate.net/publication/229764587_Structure_and_Physical_Properties_of_Hardened_Portland_Cement_Paste (date of access: 24.01.2026).

Lozovskij B.M., Makarenko S.V., Chubanov A.N., Laptev A.A. (2021) Issledovanie po polucheniyu cementov nizkoj vodopotrebnosti s ispol'zovaniem karbonatnyh i kremnezemistyh dobavok. *Nauka, tekhnologii, obshchestvo – NTO-2021:* Sbornik nauchnyh statej po materialam vserossijskoj nauchnoj konferencii, 29-31.07.2021, Krasnoyarsk: Krasnoyarskij kraevoj Dom nauki i tekhniki Rossijskogo Soyuza nauchnyh i inzhenernyh obshchestvennyh ob"edinenij, Sibirskij nauchnyj centr DNIT, 69-73 [Electronic resource]: URL: https://ruconfdomnit.ru/media/cards/pdfs/%D1%81%D0%B1%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D0%BA_%D0%9D%D0%A2%D0%9E-2021.pdf (date of access: 11.01.2026).

Lothenbach B., Bernard E., Zhou Z., German A., Montserrat-Torres P., Winnefeld F. (2025)

Critical review of the properties of MgO – magnesium carbonate cements. *Cement and Concrete Research,* 200, 108092. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2025.108092 [Electronic resource]: URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884625003114 (date of access: 11.01.2026).

Fei J., Mingshan Z., Maochun X., Liwu M. (2024) Maximising the benefits of calcium carbonate in sustainable cements: opportunities and challenges associate d with alkaline waste carbonation. *Materials Sustainability,* 2, 1. DOI: https://doi.org/10.1038/s44296-024-00005-z [Electronic resource]: URL: https://www.nature.com/articles/s44296-024-00005-z#Abs1 (date of access: 11.01.2026).

Поступила в редакцию: 10.02.2026
Одобрена: 31.03.2026
Первая публикация: 26.06.2026

МРНТИ: 76.01.11 https://doi.org/10.65247/3136-8042-2026-3.02

ФАРМАЦЕВТИКАЛЫҚ ТӘЖІРИБЕДЕ ЖАСАНДЫ ИНТЕЛЛЕКТІНІ ҚОЛДАНУДЫҢ ЭТИКАЛЫҚ, ҚҰҚЫҚТЫҚ ЖӘНЕ ЭКОНОМИКАЛЫҚ АСПЕКТІЛЕРІ

*[1]*А.ӘБДІӘКІМ, [1]М.И.ТЛЕУБАЕВА*
[1]С.Ж.Асфендияров атындағы Қазақ ұлттық медицина университеті
**aaksaule39@gmail.com, tleubayeva.m@kaznmu.kz*

Аңдатпа. Бұл мақалада тиісті фармацевтикалық тәжірибеде жасанды интеллектіні (ЖИ) қолданудың негізгі бағыттары қарастырылып, оның этикалық, құқықтық және экономикалық аспектілері талданады. Денсаулық сақтау мен фармацевтикалық қызметте ЖИ технологияларының қарқынды дамуы мен енгізілуі туралы мәліметтер қарастырылады. ЖИ дәрілік терапияны жекешелендіру, дәрілік заттардың қауіпсіздігін бақылау және фармацевт жұмысының тиімділігін арттыруда жаңа мүмкіндіктер береді. Дегенмен, пациент деректерінің құпиялығын сақтау, алгоритмдер қателігі үшін жауапкершілікті бөлу, құқықтық реттеу мәселелері туындайды. Сонымен қатар, ЖИ енгізудің экономикалық тиімділігі жоғары болғанымен, бастапқы инвестиция мен кадрларды даярлау шығындары қосымша кедергілер тудырады. Мақалада халықаралық тәжірибелер қарастырылады. Қазақстан Республикасының тұрақты даму мақсаттары аясында цифрлық трансформацияның, соның ішінде жасанды интеллектіні дамытудың стратегиялық маңызы атап өтіледі.
Түйін сөздер: жасанды интеллект, фармацевтикалық тәжірибе, этика, құқық, экономика, денсаулық сақтау.

Этические, правовые и экономические аспекты применения искусственного интеллекта в фармацевтической практике

[1]А.Әбдіәкім, [1]М.И.Тлеубаева
[1]Казахский национальный медицинский университет имени С.Д.Асфендиярова (Алматы, Казахстан)

Аннотация. В данной статье рассматриваются основные направления применения искусственного интеллекта (ИИ) в надлежащей фармацевтической практике, а также анализируются его этические, правовые и экономические аспекты. Освещаются вопросы стремительного развития и внедрения технологий ИИ в сфере здравоохранения и фармацевтической деятельности. ИИ открывает новые возможности для персонализации лекарственной терапии, мониторинга безопасности лекарственных средств и повышения эффективности работы фармацевта. Вместе с тем возникают проблемы обеспечения конфиденциальности данных пациентов, распределения ответственности за ошибки алгоритмов и правового регулирования. Кроме того, несмотря на высокую экономическую эффективность внедрения ИИ, первоначальные инвестиции и затраты на подготовку кадров создают дополнительные барьеры. В статье рассматривается международный опыт. В рамках целей