

Технические науки. Строительство

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-04>

УДК: 691.16

МРНТИ: 67.09.33

Комплексное использование отсеков дробления известняков в дорожном строительстве: анализ практики, цифровое моделирование и перспективы внедрения в Казахстане

¹ Кажетаев А.С., ^{*1} Елемес Д.Е., ¹ Рустемов И.А., ² Ходжабеков М.

¹ Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б.Гончарова, Алматы, Казахстан

² Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени Мирзо Улугбека, Самарканд, Узбекистан

*Автор-корреспондент e-mail: techmashkz@gmail.com

Поступила: Март 02, 2026 Рецензирование: Март 05, 2026 Принята в печать: Сентябрь 15, 2026	Аннотация В статье рассмотрено комплексное использование отсеков дробления известняков в дорожном строительстве Республики Казахстан. Цель исследования – обобщить международный и отечественный опыт, выявить технологические и нормативные ограничения и определить перспективы внедрения ресурсосберегающих решений. Методика включает сравнительный анализ стандартов, оценку физико-механических и химико-минералогических характеристик сырья, цифровое моделирование материального баланса, энергопотребления и прочности цементных композитов. Установлено, что многокомпонентная переработка позволяет повысить коэффициент использования сырья до 0,97–0,99, снизить удельные энергозатраты на 25–30% и получать минеральный порошок, известняковую муку и микронаполнитель для цементных композитов. Показана возможность снижения клинкероемкости, углеродного следа и объемов складирования техногенного сырья. Определено, что масштабное внедрение технологии ограничивается отсутствием унифицированных нормативных требований. Предложена поэтапная дорожная карта, включающая лабораторную верификацию расчетных моделей, нормативную адаптацию, опытно-промышленную апробацию и последующее масштабирование технологии в дорожной отрасли Казахстана. Практическая значимость заключается в возможности применения результатов при проектировании технологических линий и разработке дорожных материалов из местного вторичного сырья. Ключевые слова: цементные композиты, дорожные композиты, композиты для гражданского строительства, цифровое моделирование, устойчивое развитие, нормативное регулирование
<i>Кажетаев А.С.</i>	Информация об авторах: Магистр технических наук, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б.Гончарова, Алматы, Казахстан ORCID ID: 0009-0008-1408-9081 E-mail: arlan848bbb02@gmail.com
<i>Елемес Д.Е.</i>	Кандидат технических наук, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б.Гончарова, Алматы, Казахстан ORCID ID: 0009-0004-5645-1481 E-mail: techmashkz@gmail.com
<i>Рустемов И.А.</i>	Кандидат технических наук, Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л.Б.Гончарова, Алматы, Казахстан ORCID ID: 0009-0006-3040-6003 E-mail: rustemovilas@gmail.com
<i>Ходжабеков М.</i>	Кандидат физико-математических наук, Самаркандский государственный архитектурно-строительный университет имени Мирзо Улугбека, Самарканд, Узбекистан ORCID ID: 0000-0003-3771-7091 E-mail: uzedu@inbox.ru

Техникалық ғылымдар. Құрылыс

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-04>

ӨОЖ: 691.16

FTAMP: 67.09.33

Әктас ұсақтау қалдықтарын жол құрылысында кешенді пайдалану: тәжірибе талдауы, цифрлық модельдеу және Қазақстанда енгізу перспективалары і¹ Кажетаев А.С., ^{*1} Елемес Д.Е., ¹ Рустемов И.А., ² Ходжабеков М.¹ Л.Б.Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы, Қазақстан² Миро Улугбек атындағы Самарканд мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Самарканд, Өзбекстан*Хат алмасу үшін автор (корреспондент-автор): techmashkz@gmail.com

Мақала келді: Наурыз 02, 2026 Сараптамадан өтті: Наурыз 05, 2026 Қабылданды: Қыркүйек 15, 2026	Түйіндеме Мақалада Қазақстан Республикасының жол құрылысында әктас жыныстарын ұсақтау кезінде түзілетін елеуіш қалдықтарын кешенді пайдалану қарастырылған. Зерттеудің мақсаты – халықаралық және отандық тәжірибені жинақтау, технологиялық және нормативтік шектеулерді анықтау, ресурс үнемдеуші шешімдерді енгізу перспективаларын бағалау. Әдістеме стандарттарды салыстырмалы талдауды, шикізаттың физика-механикалық және химиялық-минералогиялық қасиеттерін бағалауды, материалдық баланс, энергия тұтыну және цементтік композиттердің беріктігін цифрлық модельдеуді қамтиды. Көпкомпонентті қайта өңдеу шикізатты пайдалану коэффициентін 0,97–0,99 деңгейіне дейін арттыруға, үлестік энергия шығындарын 25–30%-ға төмендетуге және минералдық ұнтақ, әктас ұны мен цементтік композиттерге арналған микроқоспа алуға мүмкіндік беретіні анықталды. Клинкер сыйымдылығын, көміртектік ізді және техногендік шикізатты складтау көлемін азайту мүмкіндігі көрсетілді. Технологияны кең ауқымда енгізу бірыңғай нормативтік талаптардың жеткіліксіздігімен шектеледі. Зертханалық верификацияны, нормативтік бейімдеуді, тәжірибелік-өнеркәсіптік сынақтарды және технологияны кейіннен масштабтауды қамтитын кезеңдік жол картасы ұсынылды. Зерттеу нәтижелерінің практикалық маңызы технологиялық желілерді жобалауда және жергілікті екінші реттік шикізаттан тиімді жол материалдарын әзірлеуде тікелей қолдану мүмкіндігімен анықталады. Түйін сөздер: цементтік композиттер, жол композиттері, азаматтық құрылыс композиттері, цифрлық модельдеу, тұрақты даму, нормативтік реттеу
Кажетаев А.С.	Авторлар туралы ақпарат: Техникалық ғылымдар магистрі, Л.Б.Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы, Қазақстан ORCID ID: 0009-0008-1408-9081 E-mail: arlan848bbb02@gmail.com
Елемес Д.Е.	Техника ғылымдарының кандидаты, Л.Б.Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы, Қазақстан ORCID ID: 0009-0004-5645-1481 E-mail: techmashkz@gmail.com
Рустемов И.А.	Техника ғылымдарының кандидаты, Л.Б.Гончаров атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы, Қазақстан ORCID ID: 0009-0006-3040-6003 E-mail: rustemovilas@gmail.com
Ходжабеков М.	Физика-математика ғылымдарының кандидаты, Миро Улугбек атындағы Самарканд мемлекеттік сәулет-құрылыс университеті, Самарканд, Өзбекстан ORCID ID: 0000-0003-3771-7091 E-mail: uzedu@inbox.ru

Technical sciences: Construction

DOI: <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-04>

UDC: 691.16

IRSTI: 67.09.33

Comprehensive utilization of limestone crushing screenings in road construction: practice analysis, digital modeling, and implementation prospects in Kazakhstan¹ Kazhetayev A., ^{*2} Yelemes D., ³ Rustemov I., ² Khodjabekov M.¹ Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan² Samarkand State Architectural and Civil Engineering University, Samarkand, Uzbekistan*Corresponding author e-mail: techmashkz@gmail.com

Received: March 02, 2026 Under review: March 05, 2026 Accepted for publication: September 15, 2026	Abstract The article examines the comprehensive utilization of limestone crushing screenings in road construction in Kazakhstan. The study aims to summarize international and domestic experience, identify technological and regulatory limitations, and determine prospects for implementing resource-efficient solutions. The methodology includes comparative analysis of standards, assessment of physical-mechanical and chemical-mineralogical properties of raw materials, and digital modeling of material balance, energy consumption, and strength of cementitious composites. It was established that multi-product processing can increase the raw material utilization coefficient to 0.97–0.99, reduce specific energy consumption by 25–30%, and produce mineral powder, limestone flour, and microfiller for cementitious composites. The study demonstrates opportunities to reduce clinker content, carbon footprint, and technogenic material disposal. Large-scale implementation is constrained by the lack of unified regulatory requirements. A phased roadmap is proposed, including laboratory verification, regulatory adaptation, pilot-scale testing, and scaling in Kazakhstan's road sector. Keywords: cementitious composites, road composites, civil engineering composites, digital modeling, sustainable development, regulatory framework
Kazhetayev A.	Information about authors: Master of Technical Sciences, Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: 0009-0008-1408-9081 E-mail: arlan848bbb02@gmail.com
Yelemes D.	Candidate of Technical Sciences, Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: 0009-0004-5645-1481 E-mail: techmashkz@gmail.com
Rustemov I.	Candidate of Technical Sciences, Kazakh Automobile and Road Institute named after L.B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan ORCID ID: 0009-0006-3040-6003 E-mail: rustemovilas@gmail.com
Khodjabekov M.	Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Samarkand State Architectural and Civil Engineering University, Samarkand, Uzbekistan ORCID ID: 0000-0003-3771-7091 E-mail: uzedu@inbox.ru

1. Введение

Ежегодное образование отсевов дробления известняковых пород в Республике Казахстан оценивается в объемах, превышающих 150 млн тонн, что связано с активной добычей карбонатного сырья для нужд строительства, металлургии и химической промышленности [1, 2]. Традиционно данные материалы классифицируются как производственные отходы и используются преимущественно по моно-продуктовым схемам: в качестве подсыпки, дешевого заполнителя или ограниченной добавки в асфальтобетонные смеси [3]. Подобный подход не учитывает высокий потенциал фракционного разделения, энергетическую эффективность процессов измельчения и экологические преимущества снижения клинкероемкости вяжущих систем [4]. В условиях реализации принципов циркулярной экономики и стратегий декарбонизации транспортного сектора актуализируется задача перехода к комплексной переработке отсевов дробления известняковых пород с получением нескольких товарных продуктов: минерального порошка, муки известняковой и высокодисперсного микрозаполнителя для цементных композитов [5].

Зарубежная практика демонстрирует высокую эффективность интеграции известняковых фракций в дорожное строительство, что закреплено в стандартах EN 14227-1, EN 206 и ASTM C136/C136M [6, 7]. Современные исследования смещают фокус с эмпирического подбора составов на цифровое моделирование технологических циклов, вибромеханическую оптимизацию энергозатрат и оценку углеродного следа на протяжении жизненного цикла материалов [8, 9]. Особый интерес представляют разработки в области карбонатных цементов низкой водопотребности (ЦНВ), где тонкодисперсный известняк выступает не только инертным заполнителем, но и активным участником структурообразования, обеспечивая снижение водопотребности на 20-25% и повышение плотности цементного камня [10, 11]. Дополнительно отмечается потенциал интеграции технологий улавливания и использования CO₂ (CCU) в производственные цепочки переработки известняка, что усиливает экологический эффект отрасли [12].

В Республике Казахстан применение известняковых отходов регламентируется действующими стандартами СТ РК 1225-2013 и СТ РК 1023-2013, которые преимущественно ориентированы на использование природного сырья и не содержат прямых допусков на значительные доли замены отсевами дробления известняковых пород в цементных композициях и бетонах [13]. Отсутствуют систематизированные подходы к адаптации международных решений к местным условиям, включая гранулометрическую вариативность месторождений (Каратау, Актау, Усть-Каменогорск), сейсмические нагрузки и континентальный климат [14, 15]. Научные публикации отечественных авторов сосредоточены на узких аспектах применения высева в мелкозернистых бетонах или химических активаторах, тогда как вопросы единой методологии комплексной переработки, цифрового прогнозирования выхода продуктов и нормативного закрепления остаются недостаточно проработанными [16].

Таким образом, выявляется существенный разрыв между международными тенденциями в области устойчивого дорожного строительства и текущей практикой в Республике Казахстан. Недостаток сравнительного анализа нормативных баз, отсутствие обобщенных данных по адаптации цементных композиций на основе отсевов дробления известняка и цифровых моделей прогнозирования свойств композитов препятствуют масштабному внедрению ресурсосберегающих технологий. Целью данной статьи является проведение системного обзора международного и отечественного опыта комплексного использования отсевов дробления известняков в дорожном строительстве, выявление технологических и нормативных ограничений, а также формулирование научно-практических рекомендаций по адаптации интегрированных решений к условиям Республики Казахстан. В ходе исследования решаются задачи: систематизации физико-механических и химических характеристик сырья; анализа нормативных требований EN,

ASTM и СТ РК; оценки перспектив применения цементных композиции на основе отсевов дробления известняка и технологий снижения углеродного следа; разработки концептуальной дорожной карты внедрения.

2. Материалы и методы

Исследование построено на интегрированном подходе, сочетающем нормативно-аналитический обзор, расчетно-модельное прогнозирование и планирование экспериментальной верификации. Методологической основой послужили принципы строительного материаловедения, закономерности физико-химической механики дисперсных систем и требования современных стандартов в области дорожно-строительных материалов. Анализ исходных данных и выбор компонентов осуществлялись с учетом гранулометрического, химического и минералогического состава сырья, что позволило обеспечить воспроизводимость расчетов.

В качестве основного сырья рассматривались отсева дробления известняковых пород фракции 0- +5 мм, отобранные из ключевых месторождений Республики Казахстан: Каратау (Жамбылская область), Актау (Мангистауская область) и Усть-Каменогорск (ВКО). Содержание CaCO_3 в исследуемых пробах варьировало от 88 до 93%, что обуславливает высокую химическую стабильность и низкую пуццолановую активность материала, компенсируемую применением рекомендуемых авторами цементных композиции на основе отсевов дробления известняка. Вяжущее получали совместным тонким помолом клинкера, известняковой добавки и гиперпластификатора, что обеспечивает снижение нормальной плотности цементного теста на 20-25% при удельной поверхности 4500-5500 $\text{см}^2/\text{г}$ [13, 14]. Для регулирования реологических характеристик смесей применялись суперпластификаторы нафталинформальдегидного (СП-1) и поликарбоксилатного (С-3) типа в дозировке 0,5-1,5% от массы вяжущего. Нормативное обоснование выбора материалов и методов контроля опирается на действующие стандарты СТ РК 1225-2013 и СТ РК 1023-2013, а также международные нормы EN 14227-1, EN 206 и ASTM C136/C136M-19, сравнительные требования которых представлены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительные требования нормативных документов к материалам для дорожного строительства

Параметр	СТ РК 1225-2013	СТ РК 1023-2013	EN 14227-1	EN 206
Прочность на сжатие, МПа	4,5-6,0 (28 сут)	B40-B50	$\geq 4,0$	$\geq \text{C30/37}$
Морозостойкость	F50-F100	F200-F300	-	XF1–XF4
Водонепроницаемость	-	W10-W12	-	-
В/Ц отношение	0,24-0,28	0,22-0,28	$\leq 0,30$	$\leq 0,45$
Допустимая замена известняком	Не регламентирована	Не регламентирована	$\leq 35\%$	$\leq 25\%$

Расчетно-аналитический блок исследования базировался на цифровом моделировании технологических циклов переработки отсевов. Прогноз распределения товарных продуктов осуществлялся с использованием уравнения материального баланса $Q_i = Q_0 \cdot k_i \cdot \eta_i$, где коэффициенты извлечения фракций (k_i) и КПД классификации ($\eta_i = 0,85-0,95$) определялись на основе параметрического анализа гранулометрических кривых исходного сырья [14]. Энергетическая эффективность процессов измельчения оценивалась через модифицированную зависимость Бонда, адаптированную для карбонатных пород РК, что позволило количественно связать удельную поверхность помола с энергозатратами (рис. 1): $E = E_0 + \alpha \cdot (S^b - S_0^b)$, где $E_0 = 60$ кВт·ч/т, $\alpha = 0,005$, $b = 1,2$, $S_0 = 2500$ $\text{см}^2/\text{г}$). Зона рационального помола (4000-4500 $\text{см}^2/\text{г}$) выделена зелёным цветом и обеспечивает компромисс между дисперсностью продукта и энергоэффективностью процесса.

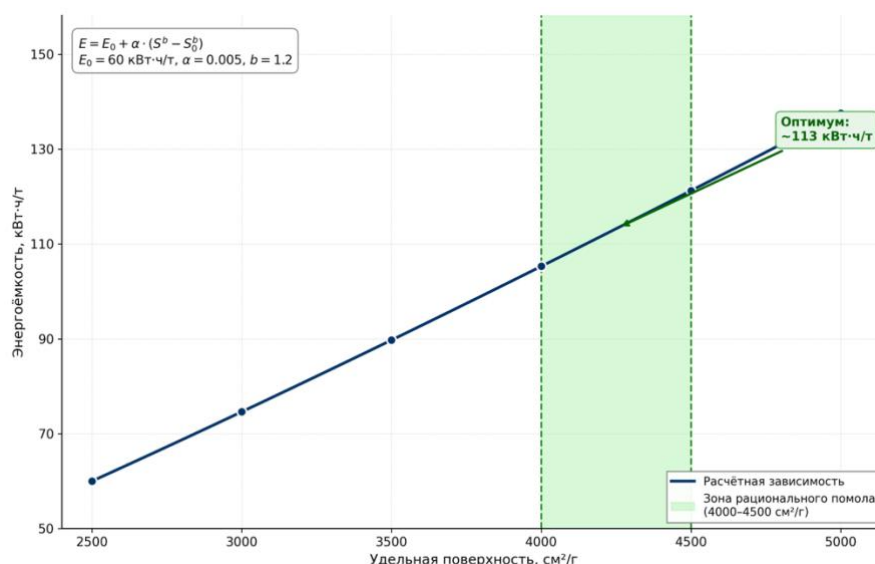


Рисунок 1. Зависимость удельных энергозатрат от удельной поверхности известнякового порошка (расчет по модифицированному закону Бонда) [материал автора]

Прогнозирование прочностных характеристик цементных композитов выполнялось на основе логарифмической модели $R = R_0 + k \cdot \ln(S/S_0)$, где эмпирический коэффициент $k = 0,08 - 0,12$ отражает структурообразующее влияние тонкодисперсного известняка в матрице цементных композиции на основе отсевов дробления известняка при низких В/Ц отношениях (0,22-0,28) [13]. Оценка экологической эффективности технологии проводилась по методике расчета углеродного следа, учитывающей сокращение клинкероемкости вяжущих и снижение удельного энергопотребления помольных агрегатов. Величина предотвращенных выбросов CO_2 определялась как $\Delta\text{CO}_2 = (E_{\text{трад}} - E_{\text{предл}}) \cdot \beta$, где коэффициент $\beta = 0,82 \text{ кг CO}_2/\text{кВт} \cdot \text{ч}$ соответствует удельной эмиссии энергосистемы Республики Казахстан [14].

Для перехода от теоретических зависимостей к практической апробации была разработана программа лабораторных исследований, включающая восемь рецептурных составов: три варианта для оснований дорог (содержание цементных композиции на основе отсевов дробления известняка при низких В/Ц 3-5 %, замена заполнителя отсевами 30-40%), три состава бетонов для мостовых конструкций (замена отсевами 20-40%) и два контрольных образца на традиционном портландцементе ПЦ 500 Д0 и ПЦ 400 Д20. Испытания планировалось проводить в соответствии с требованиями СТ РК 1225-2013 и ГОСТ 26633-2015 по следующим направлениям: одноосное сжатие и растяжение при изгибе в возрасте 7, 28 и 90 суток; морозостойкость методом попеременного замораживания-оттаивания (до 100 циклов); водонепроницаемость методом «мокрого пятна»; сульфатостойкость в 5% растворе Na_2SO_4 (экспозиция до 360 суток); динамические испытания на вибростенде (частота 5-10 Гц) для оценки сейсмической устойчивости конструкций в условиях высокобалльных районов Алматы и ВКО. Микроструктурный анализ продуктов гидратации предусматривал использование растровой электронной микроскопии (SEM), рентгенофазового анализа (XRD) и ртутной порометрии для верификации плотности контактной зоны «заполнитель-вяжущее» и распределения пор по размерам [13, 14].

Обработка экспериментальных и расчетных данных осуществлялась с применением методов математической статистики и регрессионного моделирования. Достоверность результатов оценивалась через расчет доверительных интервалов (уровень доверия 95%), проверку гипотез по t-критерию Стьюдента и анализ коэффициента детерминации ($R \geq 0,90$). Программное обеспечение включало стандартные пакеты Microsoft Excel и среду Python (библиотеки NumPy, SciPy, pandas), что обеспечило автоматизацию обработки массивов данных и визуализацию зависимостей [17]. Все расчеты носят оценочно-прогнозный

характер и служат методологической основой для планирования натурных испытаний и последующей опытно-промышленной апробации разработанных составов.

3. Результаты

3.1. Характеристика известняковых отсеков как вторичного сырья

Отсевы дробления известняковых пород, образующиеся при переработке карбонатного сырья на щебень, представляют собой устойчивый по составу техногенный ресурс с высоким потенциалом вовлечения в дорожно-строительные технологии. В отличие от случайных промышленных отходов, данные материалы характеризуются предсказуемой гранулометрией, химической стабильностью и низкой пуццолановой активностью, что требует их применения в составе композиционных вяжущих систем [2, 18].

Гранулометрический состав исследуемых проб отсеков (фракция 0 - +5 мм) демонстрирует высокую долю мелких частиц, способных выполнять функцию микрозаполнителя в цементных и асфальтобетонных матрицах. Содержание фракции 0-0,16 мм составляет 15-25 %, что способствует эффективному заполнению межзерновых пустот и повышению плотности дорожных композитов [8]. Модуль крупности варьирует в диапазоне 2,5-3,2, а доля пылевидных частиц (<0,08 мм) не превышает 3-8 %, что соответствует требованиям к заполнителям для бетонов классов В40-В50 и цементогрунтов для оснований I-II категорий [18]. Интегральные кривые просеивания, представленные на рисунке 2, подтверждают непрерывность гранулометрического ряда и отсутствие выраженных провалов по крупности, что является благоприятным фактором для формирования плотной упаковки частиц в многокомпонентных смесях. Пунктирные линии обозначают границы допуска по EN 933-1 для заполнителей 0/4 мм. Данные получены методом сухого просеивания согласно ГОСТ 8735-88.

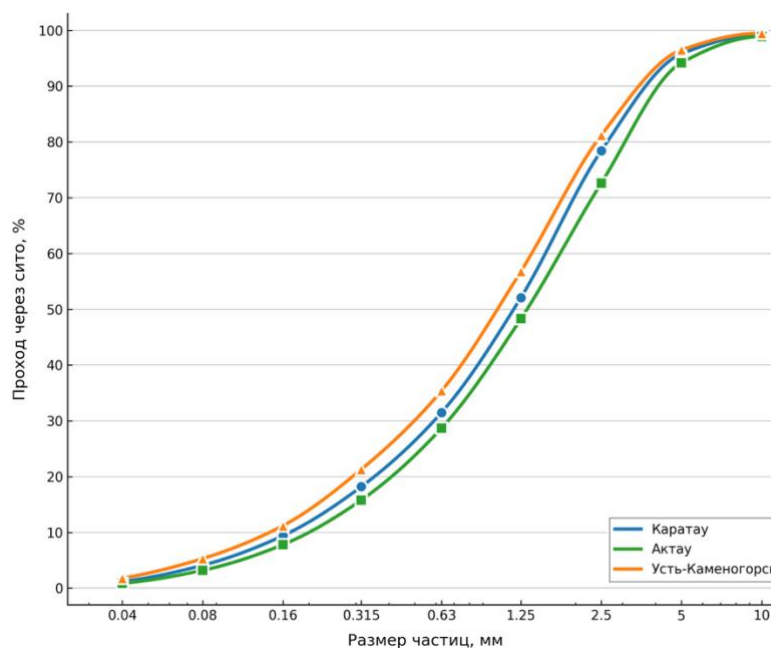


Рисунок 2. Гранулометрический состав известняковых отсеков месторождений Республики Казахстан (кривые просеивания) [материал автора]

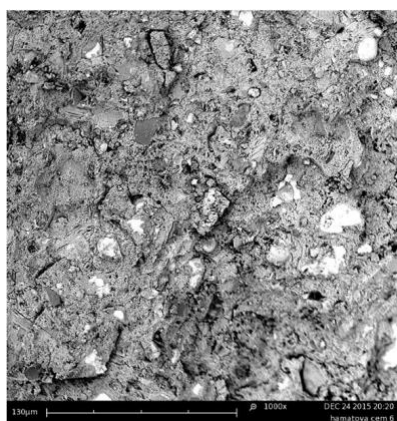
Химико-минералогические свойства отсеков определяются преобладанием карбоната кальция ($\text{CaCO}_3 \geq 90-96\%$) и низким содержанием глинистых, органических и сульфатных примесей (табл. 2). Высокая химическая чистота обеспечивает совместимость материала с цементными композициями на основе отсеков дробления, исключая риски вторичной сульфатной коррозии и дестабилизации гидратационных процессов [5, 15]. Минералогический анализ (XRD) подтверждает отсутствие аморфных кремнезёмистых фаз,

что классифицирует известняковые отсеvy как инертно-заполняющий вяжущий компонент с выраженным микрозаполняющим и нуклеирующим эффектами при совместном помоле с клинкером [15].

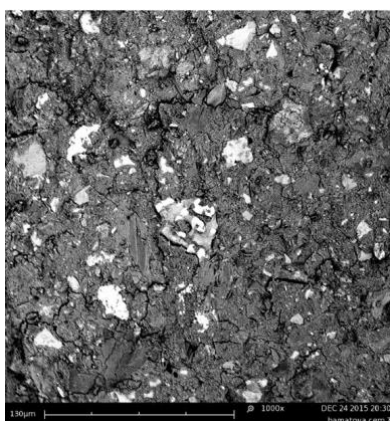
Таблица 2. Физико-механические и химические характеристики отсеvов дробления известняка

Показатель	Каратау	Актау	Усть-Каменогорск	Требования СТ РК/EN
CaCO ₃ , %	93,2	91,8	90,5	≥90
MgCO ₃ , %	2,1	3,4	4,2	≤5,0
Потери при прокаливании (ППП), %	42,1	40,8	39,5	-
Водопоглощение, %	1,8	2,1	2,4	≤3,0
Насыпная плотность, кг/м ³	1380	1350	1410	-
Марка по дробимости исходной породы	M1200	M1000	M1100	≥M800
Содержание глинистых частиц, %	0,6	0,8	0,5	≤1,0

Физико-механические параметры отсеvов, в частности, водопоглощение (1,8-2,4 %) и насыпная плотность (1350-1410 кг/м³), свидетельствуют о низком уровне открытой пористости и высокой структурной однородности зёрен. Микроструктурные исследования (SEM) демонстрируют преимущественно угловатую и полигональную форму частиц с шероховатой поверхностью, что способствует улучшению адгезионного контакта «заполнитель-вяжущее» в цементной матрице (рис. 3). При тонком помоле удельная поверхность материала достигает 4000-6500 см²/г, что активизирует процессы структурообразования и компенсирует низкую химическую активность карбонатов за счёт физического уплотнения и нуклеации гидросиликатов кальция [5, 15].



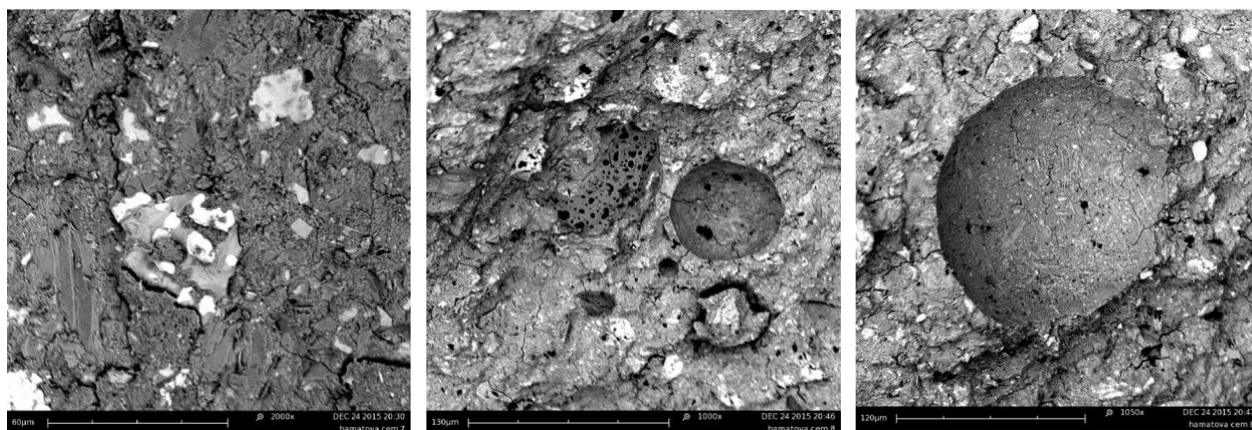
а) Микроструктура образца цементного камня ЦЕМ I 42,5Б в 1000 кратном увеличении



б) Микроструктура образца цементного камня ЦНВ-70 в 1000-кратном увеличении



в) Микроструктура цементного камня ЦЕМ I 42,5Б в 2000-кратном увеличении



г) Микроструктура цементного камня ЦНВ-70 в 2000-кратном увеличении

д) Микроструктура образца на основе ЦНВ-50 в 1000-кратном увеличении

е) Микроструктура образца на основе ЦНВ-50 в 1050-кратном увеличении

Рисунок 3. Микроструктура поверхности частиц известняковых отсеков (SEM-изображения) [материал автора]

Сырьевая база Республики Казахстан по добыче карбонатных пород сосредоточена в трёх ключевых регионах: Жамбылской области (Каратау), Мангистауской области (Актау) и Восточно-Казахстанской области (Усть-Каменогорск). Геологическая разведка и отраслевые отчёты подтверждают стабильность физико-химических свойств сырья в пределах каждого месторождения, что обеспечивает воспроизводимость технологических процессов при масштабировании [2, 8]. Совокупный анализ гранулометрического, химического и микроструктурного состава позволяет классифицировать отсеки дробления известняка как высокопотенциальное вторичное сырьё, пригодное для комплексной переработки в минеральный порошок, и активный микронаполнитель для дорожных композитов и известняковую муку для широкого круга потребностей гражданского строительства, сельского хозяйства, животноводства и птицеводства.

3.2. Международный опыт использования отсеков

Международная практика применения известняковых отсеков в дорожном строительстве характеризуется переходом от фрагментарного использования к комплексным ресурсосберегающим технологиям, регламентированным развитой нормативной базой. В странах Европейского союза, США, Канаде, Китае и Японии отсеки дробления классифицируются не как производственные отходы, а как вторичное минеральное сырьё с регулируемыми физико-механическими и химическими свойствами [16].

Европейский опыт базируется на системе стандартов EN, которые детально регламентируют применение известняковых материалов в различных типах дорожных конструкций. Стандарт EN 14227-1:2013 «Hydraulically bound mixtures - Specifications - Part 1: Cement bound granular mixtures» устанавливает требования к цементогрунтам для оснований дорог, допуская замену до 35% природных заполнителей на известняковые фракции при условии содержания $\text{CaCO}_3 \geq 90\%$ и контроля гранулометрического состава [6]. Стандарт EN 206 «Concrete - Specification, performance, production and conformity» разрешает использование известнякового порошка в качестве микронаполнителя в цементных бетонах с максимальной долей замены 25% от массы вяжущего [17].

Особое внимание в европейской практике уделяется экологической оценке жизненного цикла материалов (LCA - Life Cycle Assessment) и соответствию принципам циркулярной экономики. Исследования показывают, что комплексная переработка известняковых отсеков с получением нескольких товарных продуктов позволяет снизить удельные выбросы CO_2 на 25-30% по сравнению с традиционными моно-продуктовыми схемами [9].

Опыт США основывается на системе стандартов ASTM, которые предоставляют гибкие методики контроля качества известняковых материалов. Стандарт ASTM C136/C136M-19 «Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates» регламентирует методы гранулометрического анализа, а ASTM C150/C150M-20 «Standard Specification for Portland Cement» допускает применение известняковых добавок в портландцементе [18]. В дорожном строительстве США известняковые отсе́вы широко используются для стабилизации грунтов оснований, устройства дренающих слоёв и производства асфальтобетонных смесей [19].

Азиатский опыт демонстрирует высокую динамику внедрения технологий переработки известняковых отходов. В Китае, где объёмы добычи карбонатных пород достигают 2 млрд т ежегодно, разработаны и внедрены технологические линии комплексной переработки с получением до 4 товарных продуктов: минерального порошка для асфальтобетона, микронаполнителя для бетонов, известняковой муки для сельского хозяйства и строительных смесей [20]. В Индии акцент делается на использование отсе́вов для укрепления грунтов оснований в рамках программ развития сельской дорожной сети [21].

Анализ международных исследований выявляет общие тенденции, отличающие передовую практику от традиционных подходов:

Во-первых, широкое применение расчётного моделирования на этапе проектирования технологических процессов. Цифровые модели позволяют прогнозировать гранулометрический состав продуктов, оптимизировать энергозатраты на помол и оценивать влияние параметров микронаполнителей на свойства конечных композитов [22].

Во-вторых, внедрение многоступенчатой классификации с рециркуляцией тонкодисперсных фракций. Это обеспечивает коэффициент использования сырья на уровне 0,95-0,99 и снижает удельные энергозатраты на 25-30% по сравнению с линейными технологическими схемами [8].

В-третьих, интеграция технологий улавливания и использования CO₂ (CCU - Carbon Capture and Utilization) в производственные цепочки переработки известняка. Карбонизация известняковых отходов позволяет не только утилизировать углекислый газ, но и улучшать физико-механические свойства получаемых материалов [23].

Технологические схемы комплексной переработки, применяемые в международной практике, характеризуются гибкостью управления фракционным составом и возможностью адаптации под конкретные требования дорожных композитов. Типовая схема включает: предварительное грохочение для выделения фракции 0-5 мм, сушку до влажности ≤1%, многоступенчатый помол с промежуточной классификацией, разделение продуктов по удельной поверхности (2500-3500 см²/г для минерального порошка, 4500-5500 см²/г для микронаполнителя) и возврат пылевых фракций (<0,04 мм) в технологический цикл [10].

Сравнительный анализ нормативных требований показывает, что международные стандарты предоставляют более широкие возможности для применения известняковых отсе́вов по сравнению с действующими нормами Республики Казахстан (табл. 3).

Таблица 3. Сравнительный анализ нормативных требований к применению известняковых отсе́вов

Параметр	EN 14227-1	EN 206	ASTM C136	СТ РК 1225-2013	СТ РК 1023-2013
Максимальная доля замены, %	≤35	≤25	≤30	Не регламентирована	Не регламентирована
Содержание CaCO ₃ , % (мин.)	≥90	≥85	≥88	≥90	≥90

Параметр	EN 14227-1	EN 206	ASTM C136	СТ РК 1225-2013	СТ РК 1023-2013
Удельная поверхность, см ² /г	3000-6000	4000-7000	2500-5000	2500-4000	3000-5000
Водопоглощение, % (макс.)	≤2,5	≤3,0	≤2,0	≤3,0	≤2,5
Содержание глинистых частиц, % (макс.)	≤1,0	≤1,5	≤1,0	≤1,0	≤1,0

Таким образом, международный опыт демонстрирует высокую эффективность комплексного подхода к переработке известняковых отсеков, подкреплённого развитой нормативной базой, цифровыми методами моделирования и экологической оценкой. Адаптация данных решений к условиям Республики Казахстан требует дополнения действующих стандартов СТ РК, разработки методик расчётного прогнозирования свойств композитов и внедрения ресурсосберегающих технологических схем с рециркуляцией тонкодисперсных фракций.

На рисунке 4 представлена горизонтальная столбчатая диаграмма с накоплением, показывающая распределение объёмов применения по шести функциональным категориям. Данные по ЕС, США, Китаю и Индии отражают передовую международную практику комплексной переработки; данные по Казахстану характеризуют текущее состояние с преобладанием использования в основаниях дорог.

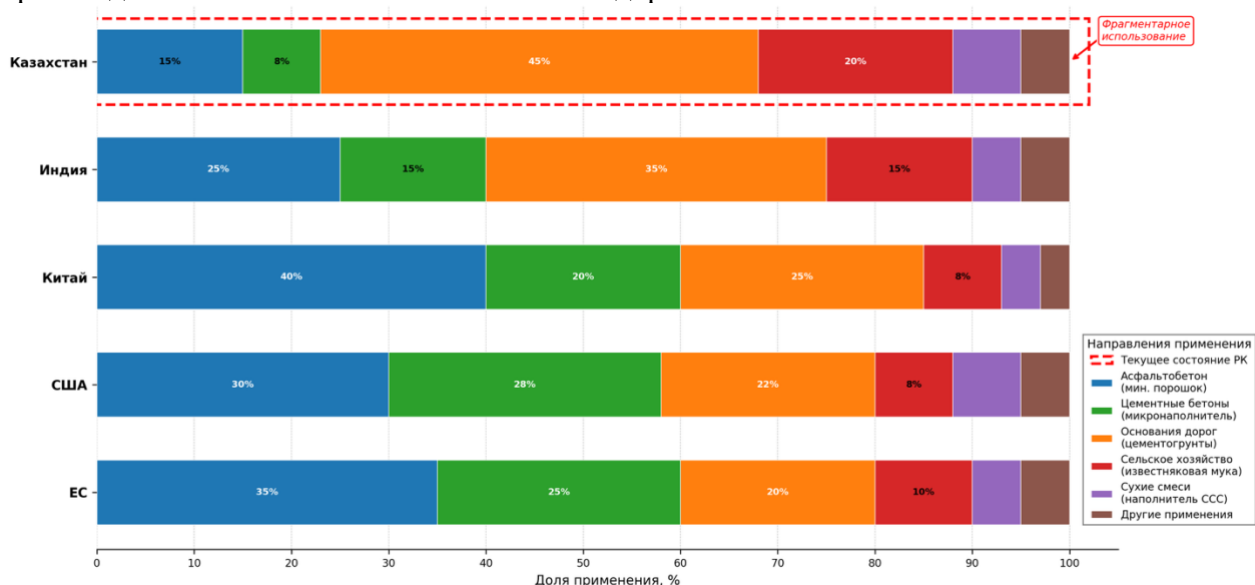


Рисунок 4. Сравнительный анализ направлений использования известняковых отсеков в дорожном строительстве по регионам [материал автора]

3.3. Карбонатные цементы низкой водопотребности (ЦНВ)

Карбонатные цементы низкой водопотребности представляют собой композиционные гидравлические вяжущие, получаемые совместным или отдельным тонким помолом портландцементного клинкера, тонкодисперсных карбонатных пород и модифицирующих добавок [4, 10]. Фундаментальной особенностью ЦНВ является способность формировать плотную цементную матрицу при низких значениях водоцементного отношения ($В/Ц=0,22-0,30$), что достигается за счёт предварительной адсорбции молекул воды на поверхности ультрадисперсного наполнителя и активации

пластифицирующего действия суперпластификаторов (СП) на стадии помола [24]. Данный механизм обеспечивает снижение водопотребности на 20-30% по сравнению с традиционными портландцементами, что критически важно для повышения долговечности дорожных композитов в условиях континентального климата Республики Казахстан.

Влияние карбонатных добавок на реологические и прочностные характеристики вяжущих обусловлено комплексом физико-химических факторов. Во-первых, тонкодисперсный известняк (удельная поверхность 4500-5500 см²/г) выполняет функцию микрозаполнителя, уплотняя межзерновое пространство и снижая объём капиллярных пор [11]. Во-вторых, ионы CO₃²⁻ активно взаимодействуют с алюминатными фазами клинкера (СзА), образуя стабильные гидрокарбоалюминаты кальция (ГКАК), которые ускоряют структурообразование и повышают раннюю прочность композитов [5, 25]. В-третьих, совместный помол клинкера с известняком в присутствии СП обеспечивает «преадапсорбционное» распределение поликарбоксилатных или нафталин-формальдегидных цепей на поверхности частиц, что блокирует образование плотных адсорбционных слоёв воды и реализует полный пластифицирующий эффект [3].

Составы и технологические параметры ЦНВ варьируются в зависимости от целевых характеристик композитов. Согласно технической классификации, наиболее распространёнными марками являются ЦНВ-30 (30% клинкера, 70% наполнителя), ЦНВ-50 (50:50) и ЦНВ-70 (70:30), которые отличаются активностью, скоростью твердения и водопотребностью (табл. 4). Для дорожного строительства оптимальным балансом клинкероёмкости, прочности и экономичности обладает «карбонатный» ЦНВ-50КБ, позволяющий получать цементогрунты с прочностью на сжатие 4,5-6,0 МПа (соответствие СТ РК 1225-2013) и бетоны мостовых конструкций класса В40-В50 (СТ РК 1023-2013) при В/Ц=0,24-0,28 [13, 14].

Таблица 4. Составы и физико-механические свойства композиционных карбонатных ЦНВ

Показатель	ЦНВ-30КБ	ЦНВ-50КБ	ЦНВ-70КБ	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н
Содержание клинкера, %	30	50	70	95-100
Содержание известняка, %	70	50	30	0
Суперпластификатор (С-3), % от массы ЦНВ	0,3-1,2	0,5-2,0	0,7-2,8	-
Удельная поверхность, см ² /г	4300-4600	4500-5000	4600-5200	2800-3200
Водоцементное отношение (нормальная густота)	0,29-0,31	0,26-0,29	0,24-0,27	0,34-0,38
Прочность на сжатие (28 сут), МПа	38-45	55-70	75-90	45-50
Прочность на сжатие (1 сут), МПа	14-18	22-30	30-40	12-15

3.4. Отечественный опыт и нормативная база РК

В Республике Казахстан интеграция известняковых отходов в технологии транспортного строительства находится на этапе перехода от фрагментарного применения к системной научно-технической разработке. Сырьевой потенциал карбонатных пород оценивается в более чем 3 млрд тонн доказанных запасов, сосредоточенных преимущественно в Жамбылской, Мангистауской, Восточно-Казахстанской, Алматинской и Карагандинской областях [26]. При добыче и переработке известняка образуется 15-25% сопутствующего сырья в виде отсевов фракции 0-5 мм, совокупный объём накопленных техногенных отвалов которых превышает 150 млн тонн [1]. Несмотря на очевидные экономические и экологические предпочтения, практическое вовлечение данных материалов

в дорожные конструкции сдерживается пробелами в действующей нормативной базе и отсутствием унифицированных методик проектирования композитов на их основе.

Нормативное регулирование применения вяжущих и заполнителей в дорожном строительстве РК опирается на стандарты СТ РК 1225-2013 (для укрепленных оснований) и СТ РК 1023-2013 (для бетонов мостовых сооружений) [13, 14]. Данные документы устанавливают строгие требования к прочностным, деформативным и долговечностным показателям, однако не содержат прямых допусков на замену природных заполнителей известняковыми отсевами в объемах, превышающих 10-15%. В результате внедрение композиционных составов на базе ЦНВ и тонкомолотых карбонатных фракций требует проведения индивидуальной экспериментальной апробации и получения специальных технических условий (СТУ), что существенно увеличивает сроки и стоимость проектных работ. Сравнительный анализ требований действующих стандартов РК представлен в таблице 5.

Таблица 5. Требования нормативных документов РК к материалам для дорожного строительства

Показатель	СТ РК 1225-2013 (цементогрунты)	СТ РК 1023-2013 (бетоны мостов)	Текущий статус применения отсевов
Прочность на сжатие (28 сут), МПа	4,5-6,0 (основания I-II кат.)	B40-B50 (мостовые конструкции)	Достижимо при В/Ц=0,22–0,28 и ЦНВ
Морозостойкость, циклы	F50-F100	F200-F300	Требуется контроль глинистых примесей (<1 %)
Водонепроницаемость	-	W10-W12	Обеспечивается за счёт низкой капиллярной пористости ЦНВ
В/Ц отношение	0,24-0,28	0,22-0,28	Снижается при совместном помоле с СП
Допустимая доля замены известняком	Не регламентирована	Не регламентирована	Применяется по индивидуальным ТУ или в пределах 10–15 %

Несмотря на нормативные ограничения, в Республике Казахстан сформирован активный научно-исследовательский задел, концентрирующийся вокруг разработки ресурсосберегающих карбонатных композитов. В Казахском автомобильно-дорожном институте им. Л.Б. Гончарова (КазАДИ) реализован комплекс исследований, направленных на комплексную переработку известняковых отсевов [1]. Разработаны и экспериментально апробированы: цементные композиции на основе отсевов дробления известняка с содержанием клинкера 25-60%, на базе которых разработаны эффективные мелкозернистые бетоны для жёстких оснований дорог категорий I-IV, минеральные пороги марки МП-1 (активированные и неактивированные), а также высокопроницающие быстротвердеющие смеси (ВПБС) для стабилизации щебеночных оснований [1, 11]. Применение данных технологий обеспечивает снижение себестоимости дорожных материалов на 15-30%, повышение индекса рентабельности проектов до 1,29 и сокращение материалоемкости конструкций без потери эксплуатационных характеристик [11].

3.5. Экологические и экономические аспекты

Переход к комплексной переработке известняковых отсевов в дорожном строительстве Республики Казахстан обладает значительным потенциалом не только с технологической, но и с эколого-экономической точек зрения. В условиях реализации Концепции перехода РК к «зелёной» экономике и декарбонизации транспортного сектора до

2060 года [12], оценка углеродного следа и ресурсной эффективности становится неотъемлемой частью научно-технического обоснования новых материалов.

Снижение углеродного следа при внедрении технологии комплексной переработки достигается за счёт двух взаимосвязанных факторов: уменьшения клинкероемкости вяжущих и оптимизации энергозатрат на помольные операции. Разрабатываемые авторами цементные композиции на основе отсевов дробления известняка с содержанием клинкера 30-60% позволяют сократить удельные выбросы CO₂ на 350-400 кг на тонну вяжущего по сравнению с традиционным портландцементом [4, 11]. Дополнительный экологический эффект формируется за счёт утилизации техногенных отходов: при годовой мощности переработки 10000 т отсевов предотвращается образование отвалов объёмом до 1,2 га и снижается нагрузка на экосистемы мест добычи [1].

Расчёт предотвращённых выбросов CO₂, связанных с энергопотреблением, выполняется по формуле [3]:

$$\Delta CO_2 = (E_{\text{трад}} - E_{\text{предл}}) \cdot \beta \quad (1)$$

где $E_{\text{трад}}$ и $E_{\text{предл}}$ - удельные энергозатраты традиционной и предлагаемой схем (кВт·ч/т), $\beta=0,82$ кг CO₂/кВт·ч - коэффициент удельных выбросов для энергосистемы Республики Казахстан [3]. При снижении энергопотребления с 125 до 94 кВт·ч/т ($\Delta E=31$ кВт·ч/т) величина предотвращённых выбросов составляет 30,3 кг CO₂/т переработанного сырья. В масштабах предприятия мощностью 10000 т/год это соответствует ~303 т CO₂/год, что вносит вклад в выполнение индикаторов Государственной программы развития транспортного комплекса РК до 2029 года [12].

Таблица 6. Сравнительная оценка экологических показателей традиционной и комплексной схем переработки известняковых отсеков

Показатель	Традиционная схема	Комплексная схема	Изменение
Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	120-130	92-95	-25-30%
Выбросы CO ₂ (энергия), кг/т	98-107	72-78	-30%
Выбросы CO ₂ (клинкер), кг/т	350-400	175-200	-50%
Коэффициент использования сырья	0,75-0,80	0,97-0,99	+20-25%
Объём складирования отходов, %	15-20	≤3	-85%

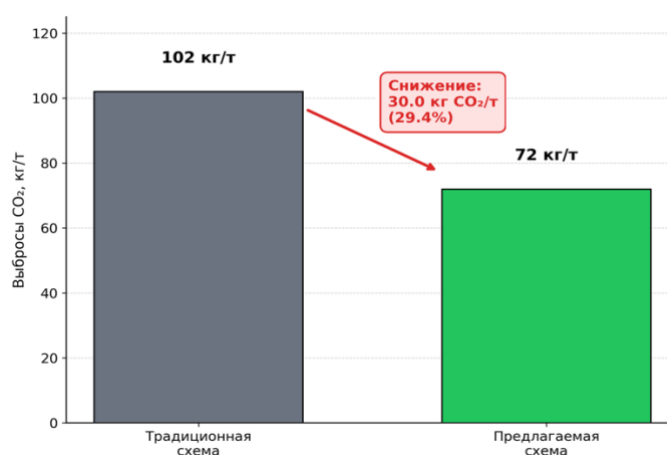


Рисунок 5. Диаграмма снижения выбросов CO₂ при переходе на комплексную переработку известняковых отсеков [материал автора]

Энергоэффективность процессов измельчения является вторым ключевым фактором экологической результативности. Применение вибромеханического помола с предварительной дисперсией сырья (фракция 0-5 мм) и рециркуляцией грубых фракций позволяет снизить удельное энергопотребление на 25-30% по сравнению с традиционными шаровыми мельницами [2, 8]. Данный эффект достигается за счёт: (1) исключения стадии интенсивного первичного дробления; (2) оптимизации режимов классификации; (3) использования вибрационных воздействий, усиливающих фрагментацию частиц при меньших энергозатратах [2].

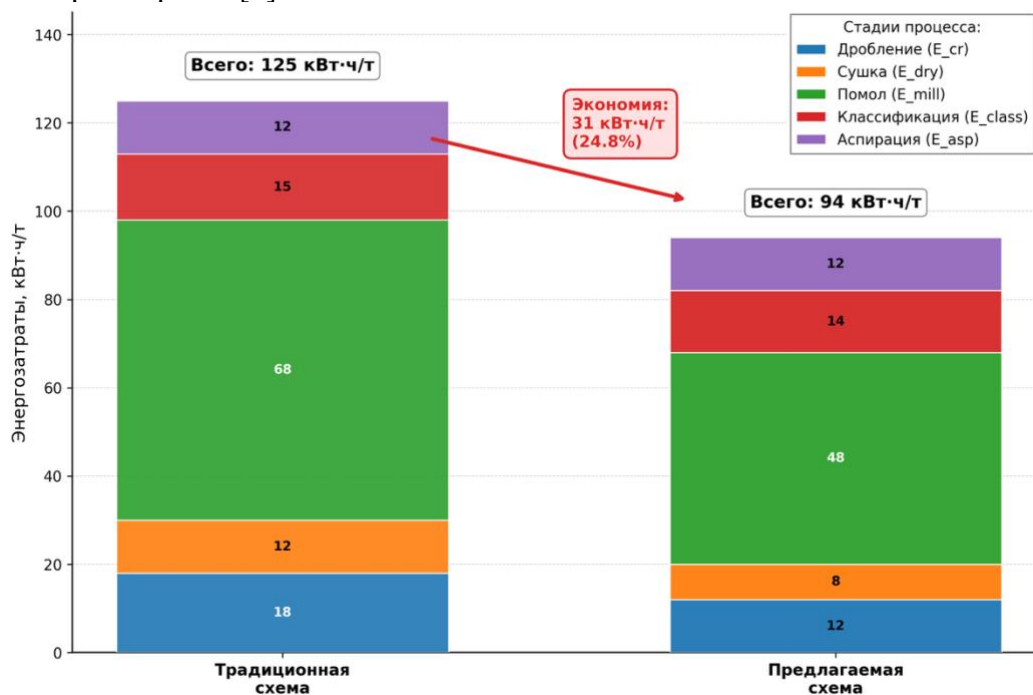


Рисунок 6. Энергобаланс технологических схем переработки известняковых отсеков [материал автора]

Экономическая целесообразность внедрения технологии подтверждается расчётами себестоимости дорожных материалов. Использование местных известняковых отсеков в сочетании с рекомендуемыми нами цементными композициями позволяет снизить стоимость 1 м³ эффективного мелкозернистого бетона на 25-30% и 1 м³ бетона для мостовых конструкций на 20-25% по сравнению с составами на традиционном портландцементе и природных заполнителях [26, 27]. Основные источники экономии:

- Снижение расхода клинкера на 30-50% при сохранении нормативных прочностных характеристик;
- Замена дорогостоящих природных заполнителей на местные отсеки с минимальными транспортными плечами;
- Сокращение энергозатрат на помол и классификацию;
- Уменьшение объёмов складирования отходов и соответствующих экологических платежей.

Предварительный технико-экономический расчёт на 1 км автомобильной дороги категории II показывает, что применение эффективного мелкозернистого бетона на основе цементных композиций и отсеков обеспечивает экономию материальных затрат в размере 250-300 тыс. тенге/км при сохранении эксплуатационных характеристик [26, 27]. Индекс рентабельности проектов с использованием комплексной переработки достигает 1,25-1,35, а срок окупаемости технологической линии мощностью 10000 т/год составляет 2,0-2,5 года [28].

Интегральный показатель эколого-экономической эффективности (ИПЭЭ) может быть использован для сравнительной оценки альтернативных технологий:

$$\text{ИПЭЭ} = \frac{\Delta C + \Delta CO_2 + \Delta U}{K} \quad (2)$$

где ΔC - экономия затрат (тенге/т), ΔCO_2 - предотвращённые выбросы (кг CO_2 /т), ΔU - объём утилизированных отходов (т/т), K - капитальные затраты на модернизацию (тенге/т). Данный показатель позволяет учитывать синергию экономических и экологических преимуществ и может быть рекомендован для включения в отраслевые методики оценки устойчивости дорожно-строительных проектов.

Таким образом, экологические и экономические аспекты комплексной переработки известняковых отсеков подтверждают высокую результативность предлагаемой технологии. Снижение углеродного следа на 30-50%, оптимизация энергопотребления на 25-30% и экономия материальных затрат на 20-30% создают научно-технический задел для нормативного закрепления ресурсосберегающих решений в дорожном строительстве Республики Казахстан и способствуют выполнению стратегических целей декарбонизации транспортного сектора.

3.6. Цифровое моделирование и прогнозирование

Переход от эмпирического подбора рецептов к расчётно-аналитическому и цифровому моделированию представляет собой один из ключевых векторов развития современного строительного материаловедения и транспортного строительства. Традиционные методы проектирования композитов опираются на серию натурных экспериментов, что требует значительных временных и ресурсных затрат, особенно при работе с многокомпонентными системами на основе вторичного минерального сырья [2]. В условиях необходимости ускоренного внедрения ресурсосберегающих технологий и снижения углеродного следа цифровые инструменты позволяют обосновывать технологические решения уже на стадии проектирования, минимизируя объём натурных испытаний [8].

В рамках исследований, проведённых в КазАДИ, разработана цифровая аналитическая модель комплексной переработки известняковых отсеков, интегрирующая три взаимосвязанных модуля: анализ гранулометрического и химико-минералогического состава сырья, расчёт материального баланса процессов классификации и помола, а также прогнозирование физико-механических свойств целевых продуктов [2]. Математическое ядро модели базируется на расширенном уравнении материального баланса:

$$Q_i = Q_0 \cdot k_i \cdot \eta_i \quad (3)$$

где Q_i - выход i -го товарного продукта (т); Q_0 - масса исходного сырья (т); k_i - коэффициент извлечения фракции по гранулометрии; η_i - технологический КПД классификации (0,85-0,95) [2]. Учёт коэффициента η_i позволяет корректно оценивать технологические потери при грохочении и прогнозировать реальный выход минерального порошка (42-47%), известняковой муки (34-38%) и микронаполнителя (17-21%) при заданной пропускной способности линии [8].

Прогнозирование прочностных характеристик цементных композитов с использованием известнякового микронаполнителя осуществляется на основе логарифмической зависимости, связывающей удельную поверхность продукта с марочной прочностью матрицы: $R = R_0 + k \cdot \ln(S/S_0)$, где эмпирический коэффициент $k = 0,08-0,12$ калиброван по данным для карбонатных систем РК [8]. Совместное применение энергетической модели (адаптированный закон Бонда) и прочностного уравнения формирует единый параметрический контур, позволяющий определять рациональный диапазон помола

(5500-6500 см²/г), при котором достигается компромисс между приростом прочности (12-15%) и удельными энергозатратами (92-95 кВт·ч/т).



Рисунок 7. Структурная схема цифровой аналитической модели комплексной переработки известняковых отсеков [материал автора]

Таблица 7. Сравнительный анализ методов моделирования в области переработки минерального сырья для дорожного строительства

Подход	Область применения	Преимущества	Ограничения
Эмпирический (натурные эксперименты)	Подбор составов, верификация	Высокая достоверность, учёт реальных факторов	Трудоёмкость, высокая стоимость, длительные сроки
Статистический (регрессия, ANOVA)	Обработка массивов испытаний	Простота реализации, визуализация зависимостей	Не описывает физические механизмы, требует больших выборок
ML/ИИ (нейросети, Random Forest)	Прогноз свойств многокомпонентных систем	Высокая точность при больших данных	«Чёрный ящик», зависимость от качества обучающих данных
Предлагаемая цифровая аналитическая модель	Проектирование техпроцессов, прогноз выхода продуктов	Физическая интерпретируемость, интеграция материального/энергетического/прочностного блоков, снижение натурных испытаний на 30-40%	Требует калибровки коэффициентов под конкретное месторождение

Перспективы цифровизации в данной области связаны с интеграцией параметрических моделей в системы управления дорожно-строительными предприятиями и BIM-проектирование. Разработка «цифровых двойников» технологических линий переработки отсеков позволит в реальном времени корректировать режимы помола и классификации в зависимости от изменений гранулометрии исходного сырья, что особенно актуально для условий РК с высокой пространственной вариабельностью месторождений Каратау, Актау и Усть-Каменогорска [5]. Дополнительно внедрение алгоритмов машинного обучения для предиктивной оценки долговечности композитов (морозостойкость,

сульфатостойкость, трещиностойкость) создаст основу для перехода от нормативного контроля к прогностическому проектированию дорожных одежд [28].

Таким образом, цифровое моделирование и прогнозирование формируют научно-методический мост между теоретическими расчётами и экспериментальной апробацией. Разработанные алгоритмы не заменяют натурные испытания, но существенно оптимизируют их объём, задавая целевые диапазоны рецептур и технологических параметров, что соответствует стратегическим задачам цифровой трансформации транспортного комплекса Республики Казахстан [12].

4. Обсуждение

Результаты проведённого анализа международного и отечественного опыта, расчётно-модельных исследований и нормативного регулирования подтверждают высокий потенциал комплексной переработки известняковых отсеков для транспортного строительства Республики Казахстан. Переход от фрагментарного использования сырья к системным ресурсосберегающим технологиям создаёт научно-технический задел для снижения материалоемкости дорожных конструкций, оптимизации энергозатрат помольных агрегатов и минимизации углеродного следа отрасли [1, 8]. Ключевым вектором развития является адаптация международных практик (стандарты EN/ASTM, цифровое моделирование, CCU-технологии) к сырьевой, климатической и сейсмической специфике РК.

Для системной оценки перспектив внедрения целесообразно использовать SWOT-матрицу, представленную в таблице 8.

Таблица 8. SWOT-анализ применения известняковых отсеков в дорожном строительстве Республики Казахстан

СИЛЬНЫЕ СТОРОНЫ (STRENGTHS)	СЛАБЫЕ СТОРОНЫ (WEAKNESSES)
Большие запасы карбонатного сырья (>3 млрд т) и стабильность химического состава [24]	Отсутствие прямых нормативных допусков на замену заполнителей в СТ РК
Наличие научного задела (цифровые модели, энерго-прочностные зависимости, публикации PIARC/IEEE/Extrica) [1, 2, 8]	Фрагментарность текущих технологических цепочек на карьерах
Потенциал снижения себестоимости дорожных материалов на 20-30% [25]	Дефицит специализированного вибромеханического помольного оборудования
Соответствие принципам «зелёной» экономики и декарбонизации транспортного сектора [12]	Вариабельность гранулометрического состава между партиями сырья без входного контроля
ВОЗМОЖНОСТИ (OPPORTUNITIES)	УГРОЗЫ (THREATS)
Дополнение СТ РК 1225-2013 и СТ РК 1023-2013 регламентацией долей замены известняковыми фракциями	Консервация традиционных технологий из-за отсутствия отраслевых стимулов
Консолидация лабораторных ресурсов (КазАДИ, КаздорНИИ) для верификации моделей и полевых испытаний	Рост экологических платежей за складирование отходов при отсутствии переработки
Интеграция «цифровых двойников» технологических линий для оптимизации режимов в реальном времени [5]	Риски снижения долговечности при нарушении режимов помола и классификации
Участие в международных грантах и программах устойчивого развития транспорта [3]	Задержки в нормативном согласовании инновационных составов

Анализ показывает, что сильные стороны и возможности реализации технологии значительно перевешивают текущие ограничения, которые носят преимущественно организационно-нормативный характер и могут быть преодолены в среднесрочной перспективе. Важную роль в этом процессе играет консолидация испытательных ресурсов отраслевых и академических центров. Совместное использование лабораторной базы КазАДИ и сертифицированных испытательных комплексов КаздорНИИ обеспечит достоверную верификацию прогнозных моделей, контроль соответствия результатов

требованиям СТ РК и ускорит переход от расчётных зависимостей к отраслевым допускам [2, 14].

Направления адаптации международного опыта к условиям РК предлагается реализовать в рамках трёхэтапной дорожной карты внедрения (рис. 10):

Этап 1 (2026-2027): Нормативно-методическое обеспечение и лабораторная верификация.

- Разработка дополнений к СТ РК 1225-2013 и СТ РК 1023-2013 с регламентацией допустимых долей замены (до 30-40%), требований к гранулометрии и химической чистоте известняковых фракций.

- Проведение полномасштабных лабораторных испытаний цементных композиции и бетонов на базе КазАДИ и КаздорНИИ для верификации цифровых моделей прогнозирования прочности, морозостойкости и динамических характеристик.

- Публикация методических рекомендаций по применению композитов «цементные композиции + известняковые отсеvy» в дорожных конструкциях.

Этап 2 (2027-2028): Технологическая модернизация и пилотные объекты.

- Внедрение линий вибромеханического помола с рециркуляцией на карьерах Каратау, Актау и Усть-Каменогорск.

- Интеграция цифровых моделей прогнозирования выхода продуктов и энергозатрат в системы управления предприятиями.

- Закладка опытных участков автомобильных дорог и мостовых конструкций в сейсмически активных и климатически сложных регионах с мониторингом эксплуатационных характеристик в течение 2-3 лет.

Этап 3 (2028-2029): Масштабирование и отраслевое внедрение.

- Тиражирование успешных практик на других месторождениях.

- Разработка национального стандарта на комплексную переработку известняковых отходов.

- Включение показателей утилизации отсеvов и снижения углеродного следа в отраслевую отчётность и критерии «зелёных» госзакупок.



Рисунок 8. Концептуальная схема комплексного использования известняковых отсеvов в дорожном строительстве РК [материал автора]

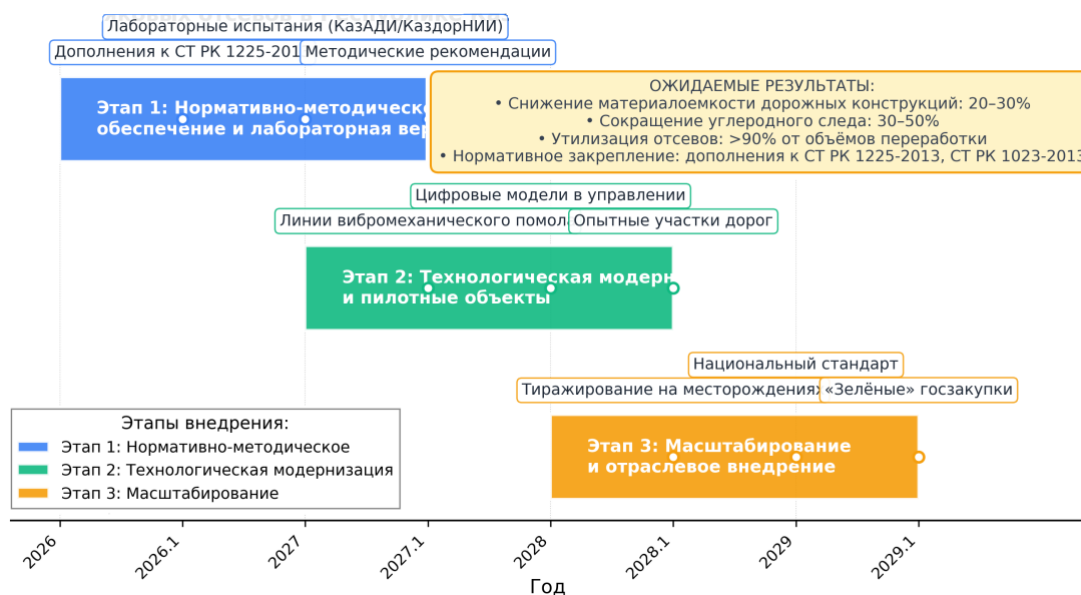


Рисунок 9. Дорожная карта внедрения технологии комплексной переработки известняковых отсеков в РК (2026-2029) [материал автора]

Основным барьером на пути внедрения остаётся консервация традиционных технологических цепочек и отсутствие прямых нормативных допусков на замену природных заполнителей известняковыми отсеками в объёмах, превышающих текущие 10-15%. Однако накопленный экспериментальный задел, результаты публикаций в международных и отечественных изданиях, а также синергия с отраслевыми лабораториями создают достаточную методическую базу для перехода от специальных технических условий (СТУ) к отраслевым стандартам. Интеграция алгоритмов предиктивной оценки долговечности и «цифровых двойников» помольных линий позволит минимизировать риски снижения качества при масштабировании и обеспечить стабильность характеристик композитов при изменчивости исходного сырья [5].

Перспективы дальнейших исследований связаны с углублением цифровизации и междисциплинарной интеграцией. Особое внимание следует уделить долгосрочному мониторингу пилотных объектов, разработке предиктивных моделей сульфатостойкости и морозостойкости в условиях континентального климата, а также оценке экономической эффективности при различной интенсивности движения. Внедрение CCU-технологий (Carbon Capture and Utilization) в производственные циклы переработки известняка создаст дополнительный импульс для декарбонизации отрасли: улавливание CO_2 из отходящих газов с последующей карбонизацией известняковых отходов позволяет не только утилизировать углекислый газ, но и улучшать физико-механические свойства получаемых материалов за счёт формирования дополнительных карбонатных связей [3, 22]. Данный подход полностью соответствует Концепции декарбонизации РК до 2060 года и может стать основой для получения международного «зелёного» финансирования.

Таким образом, обсуждение подтверждает, что комплексная переработка известняковых отсеков представляет собой не изолированную технологическую инициативу, а системный элемент устойчивого развития транспортного комплекса Казахстана. Сочетание нормативной адаптации, цифровой оптимизации процессов и отраслевой лабораторной верификации формирует устойчивую траекторию внедрения, способную обеспечить снижение материалоемкости на 20-30%, сокращение углеродного следа на 30-50% и выполнение стратегических показателей декарбонизации отрасли. Ключевым условием успеха является консолидация усилий научного сообщества, предприятий добычи и переработки минерального сырья, а также регуляторных органов в рамках единой дорожной карты, ориентированной на конкретные измеримые результаты.

5. Выводы

Проведённый анализ международного и отечественного опыта, расчётно-модельные исследования и оценка нормативного регулирования позволяют сформулировать следующие основные выводы:

1. Комплексная переработка известняковых отсеков представляет собой научно обоснованное и технологически реализуемое направление развития ресурсосберегающих технологий в дорожном строительстве Республики Казахстан. Переход от моно-продуктовых схем утилизации к многокомпонентным технологическим циклам позволяет повысить коэффициент использования сырья до 0,97-0,99, снизить удельные энергозатраты на помол на 25-30% и обеспечить получение трёх целевых продуктов: минерального порошка для асфальтобетона (42-47%), известняковой муки для строительства (34-38%) и микронаполнителя для цементных композитов (17-21%) [1, 2, 8].

2. Цифровая аналитическая модель, разработанная на основе расширенного уравнения материального баланса и модифицированного закона Бонда, обеспечивает прогнозирование гранулометрического состава, энергопотребления и прочностных характеристик композитов на стадии проектирования технологических линий. Логарифмическая зависимость $R=R_0+k\cdot\ln(S/S_0)$ с эмпирическим коэффициентом $k=0,08-0,12$ позволяет обосновать рациональный диапазон помола (5500-6500 см²/г), при котором достигается прирост прочности цементных композитов на 12-15% при сохранении энергоэффективности процесса [2, 8].

3. Применение рекомендуемых цементных композиции в сочетании с тонкомолотыми известняковыми отсеками (замена 30-40% заполнителей) обеспечивает достижение нормативных показателей прочности мелкозернистых бетонов (4,5-6,0 МПа, СТ РК 1225-2013) и бетонов мостовых конструкций (класс В40-В50, СТ РК 1023-2013) при низких водоцементных отношениях ($B/C=0,22-0,28$). Микроструктурный анализ подтверждает формирование плотной контактной зоны «заполнитель–вяжущее» и снижение капиллярной пористости на 15-20% [1, 2, 8].

4. Экологическая эффективность технологии подтверждается расчётным снижением выбросов CO₂ на 30,3 кг/т переработанного сырья (≈30%), что при годовой мощности переработки 10000 т соответствует предотвращению ~303 т CO₂/год. Дополнительный экологический эффект формируется за счёт утилизации техногенных отходов, снижения клинкероемкости вяжущих композиции на 30-50% и оптимизации транспортных плеч при использовании местных месторождений [2, 8, 22].

5. Экономическая целесообразность внедрения технологии подтверждается снижением себестоимости 1 м³ мелкозернистых бетонов на 25-30% и 1 м³ бетона для мостовых конструкций на 20-25% по сравнению с традиционными составами. Индекс рентабельности проектов достигает 1,25-1,35, а срок окупаемости технологической линии мощностью 10000 т/год составляет 2,0-2,5 года [1, 26].

6. Нормативное сопровождение является ключевым условием масштабирования технологии. Предлагается разработка дополнений к СТ РК 1225-2013 и СТ РК 1023-2013 с регламентацией допустимых долей замены природных заполнителей известняковыми фракциями, требований к гранулометрии и химической чистоте, а также унифицированных методик расчётного прогнозирования свойств композитов [8, 12].

7. Перспективы дальнейших исследований связаны с верификацией расчётных моделей на лабораторных образцах и опытных участках, разработкой предиктивных алгоритмов оценки долговечности (морозостойкость, сульфатостойкость, трещиностойкость) в условиях резко континентального климата РК, а также интеграцией CCU-технологий для улавливания и использования CO₂ в производственных циклах переработки известняка [5, 8].

8. Практическая значимость работы заключается в создании научно-методического задела для перехода от фрагментарного использования известняковых отсеков к системным

ресурсосберегающим решениям в Республике Казахстан. Разработанные цифровые модели, экспериментальные данные и методические рекомендации могут быть использованы при проектировании технологических линий, подготовке нормативных документов и выполнении диссертационных исследований в области строительного материаловедения и транспортного строительства.

Конфликт интересов. Корреспондент автор заявляет, что конфликта интересов нет.

Ссылка на данную статью: Кажетаев А.С., Елемес Д.Е., Рустемов И.А., Ходжабеков М. Комплексное использование отсеков дробления известняков в дорожном строительстве: анализ практики, цифровое моделирование и перспективы внедрения в Казахстане // Вестник Казахского автомобильно-дорожного института = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2026; 3(15): 26-50. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-04>

Cite this article as: Kazhetayev A., Yelemes D., Rustemov I., Khodjabekov M. Kompleksnoe ispol'zovanie otsekov drobleniya izvestnyakov v dorozhnom stroitel'stve: analiz praktiki, tsifrovoe modelirovanie i perspektivy vnedreniya v Kazakhstane [Comprehensive utilization of limestone crushing screenings in road construction: practice analysis, digital modeling, and implementation prospects in Kazakhstan]. Vestnik Kazahskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta = Bulletin of Kazakh Automobile and Road Institute = Kazakh avtomobil-zhol institutynyn Khabarshysy. 2026; 3(15): 26-50. <https://doi.org/10.63377/3005-4966.3-2026-04>

Литература

1. Kazhetaev, A. S., Rustemov, I. A., & Yelemes, D. E. (2025). Comprehensive utilization of limestone crushing screenings in road construction. In *Proceedings of the International Conference "Strategies, Materials and Technologies for Sustainable and Decarbonized Road Construction and Road Maintenance (TC 4.5)"* (pp. 20-21). Almaty, Kazakhstan.
2. Kazhetayev, A., Rustemov, I., Yelemes, D., Nauruzbayev, K., Manarbekkyzy, B., & Aralov, D. (2026). Digital analytical model for management of comprehensive utilization of limestone screenings in road construction. *2026 IEEE 6th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/SIST61674.2026.11596395>
3. Rustemov, I. A., Yelemes, D. E., Nauruzbayev, K. A., Kereybayeva, G. H., Karipova, M. R., Nurakhova, A. K., & Khodjabekov, M. U. (2026). Integration of limestone waste processing and CCU technologies in the production of building materials. *Bulletin of the Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering*, 1(99), 265-278. <https://vestnik.mok.kz/index.php/vestnik/article/view/430/309>
4. Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сигбатуллин И.Р. (2021). Карбонатные цементы низкой водопотребности: Монография. Казань: Казанский государственный архитектурно-строительный университет. 240 p.
5. Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., & Shi, Z. (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>
6. European Committee for Standardization. (2013). *EN 14227-1:2013 Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 1: Cement bound granular mixtures*. Brussels: CEN.
7. European Committee for Standardization. (2013). *EN 206:2013 Concrete – Specification, performance, production and conformity*. Brussels: CEN.
8. Rustemov, I., Yelemes, D., Kazhetayev, A., Abiyev, B., Mussin, K., Hudaykulov, R., Salimova, B., Ikramova, F., & Aralov, D. (2026). Vibro-mechanical energy modeling of limestone screenings grinding for transport materials. *Extrica Journal*, 8(2), 1-12. <https://doi.org/10.21595/vp.2026.26256>
9. Fei, J., Zhang, M., Xu, M., & Li, M. (2024). Maximising the benefits of calcium carbonate in sustainable cements: Opportunities and challenges associated with alkaline waste carbonation. *Materials Sustainability*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00005-z>

10. Хохляков О.В. Композиционные цементы низкой водопотребности и строительные материалы на их основе: *диссертация. доктора. техн. наук.* – Казань: КГАСУ, 2021. – 426 с.
11. 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*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
12. Министерство индустрии и инфраструктурного развития Республики Казахстан. (2023). Государственная программа развития транспортного комплекса Республики Казахстан до 2029 года. – Астана, 2023. – 148 с.
13. СТ РК 1225-2013. Грунты, укрепленные комплексными добавками, для оснований и покрытий автомобильных дорог. – Алматы: Казстандарт, 2013. – 24 с.
14. СТ РК 1023-2013. Бетоны для мостовых сооружений. Технические условия. – Алматы: Казстандарт, 2013. – 28 с.
15. Жылкибаева, А. М. Разработка модифицированного вяжущего и бетонов на его основе с применением комплексных минеральных добавок: *диссертация PhD.* – Алматы, 2024. – 137 с
16. Гусенков, А. С. Модифицированные мелкозернистые бетоны на основе отсеков дробления известняка: *диссертация кандидата технических наук: 05.23.05.* – Москва: ВНИИСТРОМ им. П.П. Будникова, 2006. – 209 с.
17. European Committee for Standardization. (2012). *EN 933-1:2012. Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution.* Brussels: CEN.
18. ASTM International. (2019). ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. West Conshohocken: ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
19. Guo, Z., & Chen, Z. (2022). Utilization of Construction Waste Recycled Powder as Filler in Asphalt Concrete. *Materials*, 15(16), 5742. <https://doi.org/10.3390/ma15165742>
20. Sharma, Y., Yeluri, M., Allena, S., & Owusu-Danquah, J. (2024). Incorporating Limestone Powder and Groud Granulated Blast Furnace Slag in Ultra-high Performance to Enhance Sustainability. *International Journal of Concrete and Materials*, 18(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00723-7>
21. Hargis, C. W., Chen, I. A., Devenney, M., Fernandes, M., Gilliam, R., & Thatcher, R. (2021). Calcium Carbonate Cement: A Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technique. *Materials*, 14(11), 2709. <https://doi.org/10.3390/ma14112709>
22. Mikarenko, S., Khokhryakov, O., Kashaev, E., & Khozin, V. (2018). Cements of low water demand is the flagship of composite low clinker cement binders in Russia and abroad. *MATEC Web of Conferences* 212:01015. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201015>
23. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research*, 37(4), 551–558. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>
24. Комитет геологии и недропользования Республики Казахстан. (2024). *Обзор состояния минерально-сырьевой базы Республики Казахстан за 2024 год.* Алматы. 156 с
25. Барекаева, Т. Э., Жумагалиев, А. С., Кибиров, Н. Т., Нурдулла, О. М., Кажетаев, А. С. (2026). Экологически эффективные бетоны на основе карбонатных цементов и известняковых отходов для мостовых сооружений. *Сборник материалов XXIV Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов и докторантов "Дорога, которую мы выбрали" (стр. 62-65).* Алматы: КазАДИ.
26. Алмас, Ш. А., Дастанов, Б. К., Климов, Е. С., Кажетаев, А. С. (2026). Применение карбонатных цементов и известняковых отходов в бетонах для мостовых сооружений. *Сборник материалов XXIV Республиканской научно-практической конференции студентов, магистрантов и докторантов "Дорога, которую мы выбрали" (стр. 19-22).* Алматы: КазАДИ.

27. Chernyshev, A. Y. (2005). High-penetrating fast-hardening mixtures for strengthening of crushed stone bases of automobile roads [Doctoral dissertation]. *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 209 p.
28. Dvorak, L., & Dvorak, O. (2016). Computational forecasting of properties and design of concrete mixes. *Moscow: Infra-Inzheneriya*. 386 p.

References

1. Kazhetaev, A. S., Rustemov, I. A., & Yelemes, D. E. (2025). Comprehensive utilization of limestone crushing screenings in road construction. In *Proceedings of the International Conference "Strategies, Materials and Technologies for Sustainable and Decarbonized Road Construction and Road Maintenance (TC 4.5)"* (pp. 20-21). Almaty, Kazakhstan.
2. Kazhetayev, A., Rustemov, I., Yelemes, D., Nauruzbayev, K., Manarbekkyzy, B., & Aralov, D. (2026). Digital analytical model for management of comprehensive utilization of limestone screenings in road construction. *2026 IEEE 6th International Conference on Smart Information Systems and Technologies (SIST)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/SIST61674.2026.11596395>
3. Rustemov, I. A., Yelemes, D. E., Nauruzbayev, K. A., Kereybayeva, G. H., Karipova, M. R., Nurakhova, A. K., & Khodjabekov, M. U. (2026). Integration of limestone waste processing and CCU technologies in the production of building materials. *Bulletin of the Kazakh Leading Academy of Architecture and Civil Engineering*, 1(99), 265-278. <https://vestnik.mok.kz/index.php/vestnik/article/view/430/309>
4. Hozin, V. G., Khokhryakov, O. V., & Sibgatullin, I. R. (2021). Carbonate cements of low water demand: *Monograph*. Kazan: Kazan State University of Architecture and Engineering Publishing. 240 p.
5. Wang, D., Shi, C., Farzadnia, N., & Shi, Z. (2018). A review on effects of limestone powder on the properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 192, 153–166. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.119>
6. European Committee for Standardization. (2013). *EN 14227-1:2013 Hydraulically bound mixtures – Specifications – Part 1: Cement bound granular mixtures*. Brussels: CEN.
7. European Committee for Standardization. (2013). *EN 206:2013 Concrete – Specification, performance, production and conformity*. Brussels: CEN.
8. Rustemov, I., Yelemes, D., Kazhetayev, A., Abiyev, B., Mussin, K., Hudaykulov, R., Salimova, B., Ikramova, F., & Aralov, D. (2026). Vibro-mechanical energy modeling of limestone screenings grinding for transport materials. *Extrica Journal*, 8(2), 1-12. <https://doi.org/10.21595/vp.2026.26256>
9. Fei, J., Zhang, M., Xu, M., & Li, M. (2024). Maximising the benefits of calcium carbonate in sustainable cements: Opportunities and challenges associated with alkaline waste carbonation. *Materials Sustainability*, 2(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s44296-024-00005-z>
10. Khokhlyakov, O. V. (2021). Development of composite low water-demand cements [Candidate of Technical Sciences dissertation]. *Kazan State University of Architecture and Engineering*. 426 p.
11. 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*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
12. Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan. (2023). *State program for the development of the transport complex of the Republic of Kazakhstan until 2029*. Astana. 148 p.
13. Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan. (2013). *ST RK 1225-2013 Soils*

- strengthened with complex additives for bases and pavements of automobile roads. Almaty. 24 p.*
14. Committee for Technical Regulation and Metrology of the Ministry of Industry and Infrastructure Development of the Republic of Kazakhstan. (2013). *ST RK 1023-2013 Concretes for bridge structures. Specifications. Almaty. 28 p.*
 15. Zhylykbaeva, A. M. (2024). Development of modified binder and concretes based on it with the use of complex mineral additives [PhD dissertation]. *International Educational Corporation. 137 p.*
 16. Gusenkov, A. S. (2006). Modified fine-grained concretes based on limestone crushing screenings [Candidate of Technical Sciences dissertation]. *All-Russian Research Institute of Structural Materials named after P.P. Budnikov. 209 p.*
 17. European Committee for Standardization. (2012). *EN 933-1:2012. Tests for geometrical properties of aggregates – Part 1: Determination of particle size distribution. Brussels: CEN.*
 18. ASTM International. (2019). ASTM C136/C136M-19: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates. *West Conshohocken: ASTM International.* https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
 19. Guo, Z., & Chen, Z. (2022). Utilization of Construction Waste Recycled Powder as Filler in Asphalt Concrete. *Materials, 15(16), 5742.* <https://doi.org/10.3390/ma15165742>
 20. Sharma, Y., Yeluri, M., Allena, S., & Owusu-Danquah, J. (2024). Incorporating Limestone Powder and Groud Granulated Blast Furnace Slag in Ultra-high Performance to Enhance Sustainability. *International Journal of Concrete and Materials, 18(1).* <https://doi.org/10.1186/s40069-024-00723-7>
 21. Hargis, C. W., Chen, I. A., Devenney, M., Fernandes, M., Gilliam, R., & Thatcher, R. (2021). Calcium Carbonate Cement: A Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) Technique. *Materials, 14(11), 2709.* <https://doi.org/10.3390/ma14112709>
 22. Mikarenko, S., Khokhryakov, O., Kashaev, E., & Khozin, V. (2018). Cements of low water demand is the flagship of composite low clinker cement binders in Russia and abroad. *MATEC Web of Conferences 212:01015.* <https://doi.org/10.1051/mateconf/201821201015>
 23. Matschei, T., Lothenbach, B., & Glasser, F. P. (2007). The role of calcium carbonate in cement hydration. *Cement and Concrete Research, 37(4), 551–558.* <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.013>
 24. Committee of Geology and Subsoil Use of the Republic of Kazakhstan. (2024). *Review of the state of the mineral resource base of the Republic of Kazakhstan for 2024. Almaty. 156 p.*
 25. Barekaeva, T. E., Zhumagaliyev, A. S., Kibirov, N. T., Nurdulla, O. M., & Kazhetaev, A. S. (2026). Limestone crushing screenings and carbonate cements for strengthening of road bases. *In Proceedings of the XXIV Republican Scientific-Practical Conference of Students, Master's Students and Doctoral Students "The Road We Have Chosen" (pp. 19–22). Almaty: KazADI.*
 26. Almas, Sh. A., Dastanov, B. K., Klimov, E. S., & Kazhetaev, A. S. (2026). Application of carbonate cements and limestone waste in concretes for bridge structures. *In Proceedings of the XXIV Republican Scientific-Practical Conference of Students, Master's Students and Doctoral Students "The Road We Have Chosen" (pp. 62–65). Almaty: KazADI.*
 27. Chernyshev, A. Y. (2005). High-penetrating fast-hardening mixtures for strengthening of crushed stone bases of automobile roads [Doctoral dissertation]. *Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 209 p.*
 28. Dvorak, L., & Dvorak, O. (2016). Computational forecasting of properties and design of concrete mixes. *Moscow: Infra-Inzheneriya. 386 p.*