

JOURNAL OF TRANSPORT



ISSUE 3, 2026 vol. 3

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164



RESEARCH, INNOVATION, RESULTS



**TOSHKENT DAVLAT
TRANSPORT UNIVERSITETI**

Tashkent state
transport university



JOURNAL OF TRANSPORT

RESEARCH, INNOVATION, RESULTS

E-ISSN: 2181-2438

ISSN: 3060-5164

VOLUME 3, ISSUE 3

SEPTEMBER, 2026



jot.tstu.uz

TASHKENT STATE TRANSPORT UNIVERSITY

JOURNAL OF TRANSPORT

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND SCIENTIFIC INNOVATION JOURNAL

VOLUME 3, ISSUE 3 SEPTEMBER, 2026

EDITOR-IN-CHIEF

SAID S. SHAUMAROV

Professor, Doctor of Sciences in Technics, Tashkent State Transport University

Deputy Chief Editor

Miraziz M. Talipov

Doctor of Philosophy in Technical Sciences, Tashkent State Transport University

The “**Journal of Transport**” established by Tashkent State Transport University (TSTU), is a prestigious scientific-technical and innovation-focused publication aimed at disseminating cutting-edge research and applied studies in the field of transport and related disciplines. Located at Temiryo‘lchilar Street, 1, office 465, Tashkent, Uzbekistan (100167), the journal operates as a dynamic platform for both national and international academic and professional communities. Submissions and inquiries can be directed to the editorial office via email at jot@tstu.uz.

The Journal of Transport showcases groundbreaking scientific and applied research conducted by transport-oriented universities, higher educational institutions, research centers, and institutes both within the Republic of Uzbekistan and globally. Recognized for its academic rigor, the journal is included in the prestigious list of scientific publications endorsed by the decree of the Presidium of the Higher Attestation Commission No. 353/3 dated April 6, 2024. This inclusion signifies its role as a vital repository for publishing primary scientific findings from doctoral dissertations, including Doctor of Philosophy (PhD) and Doctor of Science (DSc) candidates in the technical and economic sciences.

Published quarterly, the journal provides a broad spectrum of high-quality research articles across diverse areas, including but not limited to:

- Economics of Transport
- Transport Process Organization and Logistics
- Rolling Stock and Train Traction
- Research, Design, and Construction of Railways, Highways, and Airfields, including Technology
- Technosphere Safety
- Power Supply, Electric Rolling Stock, Automation and Telemechanics, Radio Engineering and Communications
- Technological Machinery and Equipment
- Geodesy and Geoinformatics
- Automotive Service
- Air Traffic Control and Aircraft Maintenance
- Traffic Organization
- Railway and Road Operations

The journal benefits from its official recognition under Certificate No. 1150 issued by the Information and Mass Communications Agency, functioning under the Administration of the President of the Republic of Uzbekistan. With its E-ISSN 2181-2438, ISSN 3060-5164 the publication upholds international standards of quality and accessibility.

Articles are published in Uzbek, Russian, and English, ensuring a wide-reaching audience and fostering cross-cultural academic exchange. As a beacon of academic excellence, the "Journal of Transport" continues to serve as a vital conduit for knowledge dissemination, collaboration, and innovation in the transport sector and related fields.

Effect of carbonate waste particle size on the structure and durability of heavyweight concrete

I. Makhamataliev¹, V. Soy¹^a, N. Mukhammadiev¹^b, F. Abdukayumov¹,
N. Erdanov¹, Sh. Uzakov¹, A. Jumageldiev¹

¹Tashkent state transport university, Tashkent, Uzbekistan

Abstract:

This study continues the investigation of the use of industrial carbonate waste in heavyweight concrete technology. Particular attention is paid to the effect of the dosage and particle size of the carbonate microfiller on concrete mix workability, compressive strength, water absorption, water resistance, and the environmental performance of the concrete composition. Cement replacement with carbonate waste at levels of 0, 5, 10, 15, and 20% was evaluated for grinding fineness values of 250, 420, and 600 m²/kg. The results show that the greatest technological effect is achieved at a replacement level of 10–15% and a grinding fineness of 420–600 m²/kg, where pore microfilling, densification of the interparticle space, and the formation of additional nucleation sites for calcium silicate hydrate are enhanced. Increasing the carbonate waste content to 20% leads to a reduction in compressive strength due to cement dilution and increased water demand. A regression model describing the relationship between compressive strength, carbonate waste content, and grinding fineness is proposed, together with practical recommendations for incorporating the material into heavyweight concrete of strength class B30–B35.

Keywords:

carbonate waste, limestone powder, marble dust, particle size, heavyweight concrete, microfiller, water absorption, compressive strength, durability, environmental performance

Влияние дисперсности карбонатного отхода на структуру и долговечность тяжелого бетона

Махаматалиев И.М.¹, Цой В.М.¹^a, Мухаммадиев Н.Р.¹^b, Абдукаюмов Ф.О.¹,
Эрданов Н.И.¹, Узаков Ш.А.¹, Жумагельдиев А.О.¹

¹Ташкентский государственный транспортный университет, Ташкент, Узбекистан

Аннотация:

В статье продолжены исследования по применению карбонатных отходов промышленности в технологии тяжелого бетона. Основное внимание уделено влиянию дозировки и дисперсности карбонатного микронаполнителя на подвижность бетонной смеси, прочность при сжатии, водопоглощение, водонепроницаемость и экологическую эффективность состава. Рассмотрены варианты замещения цемента карбонатным отходом в количестве 0, 5, 10, 15 и 20% при тонкости помола 250, 420 и 600 м²/кг. Показано, что наибольший технологический эффект достигается при дозировке 10–15% и тонкости 420–600 м²/кг, когда реализуются эффекты микрозаполнения пор, уплотнения межзернового пространства и образования дополнительных центров кристаллизации гидросиликатов кальция. При повышении содержания отхода до 20% наблюдается снижение прочности, обусловленное разбавлением цементной части и увеличением водопотребности. Предложена расчетная регрессионная зависимость прочности от содержания карбонатного отхода и тонкости помола, а также практические рекомендации по внедрению материала в состав бетона класса В30–В35.

Ключевые слова:

карбонатный отход, известняковая мука, мраморная пыль, дисперсность, тяжелый бетон, микронаполнитель, водопоглощение, прочность, долговечность, экологическая эффективность

1. Введение

Применение промышленных минеральных отходов в бетоне является одним из наиболее доступных направлений ресурсосбережения в строительной

отрасли. К числу таких материалов относятся карбонатные отходы, образующиеся при добыче, дроблении, распиловке и шлифовании известняка, мрамора и доломитизированных пород. В большинстве случаев эти отходы имеют тонкодисперсный состав,

^a <https://orcid.org/0009-0006-9599-1776>

^b <https://orcid.org/0000-0002-2306-3317>



содержат значительное количество CaCO_3 и после предварительной подготовки могут использоваться в качестве минерального микронаполнителя бетонной смеси.

В первой статье рассмотрена оценка влияния двух ключевых факторов: количества карбонатного отхода и его тонкости помола. Именно эти параметры определяют, будет ли материал работать как эффективный микронаполнитель или станет причиной избыточного разбавления цементной системы.

Согласно современным представлениям, карбонатный порошок влияет на цементные системы через несколько механизмов: физическое заполнение микропустот, ускорение гидратации клинкерных

минералов за счет эффекта зародышеобразования, а также возможное образование карбоалюминатных гидратов при взаимодействии с алюминатными фазами цемента. Однако при чрезмерной дозировке количество активного клинкерного компонента уменьшается, а водопотребность смеси возрастает, что приводит к снижению прочности и ухудшению отдельных показателей долговечности.

Поэтому задача исследования заключается не в максимальном введении отхода, а в определении рациональной технологической области, где совмещаются достаточная прочность, низкое водопоглощение, удобоукладываемость и сокращение расхода портландцемента.



Рис. 1. Технологическая схема подготовки и введения карбонатного отхода в бетонную смесь

Цель и задачи исследования

Целью работы является установление рациональной области применения карбонатного отхода промышленности в составе тяжелого бетона с учетом дозировки, тонкости помола и требований к эксплуатационным свойствам.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- подобрать диапазон содержания карбонатного отхода при частичном замещении цемента;
- оценить влияние тонкости помола отхода на подвижность бетонной смеси и формирование структуры цементного камня;
- определить изменение прочности при сжатии, водопоглощения, глубины водопоглощения и открытой пористости;
- построить расчетную регрессионную модель прочности бетона в зависимости от содержания и дисперсности карбонатного компонента;
- сформулировать практические рекомендации по применению карбонатного микронаполнителя в бетоне класса В30–В35.

2. Методика исследования

В качестве вяжущего принят портландцемент класса

активности М500 с нормальным сроком схватывания. Заполнители представлены кварцевым песком средней крупности и щебнем фракции 5–20 мм. Для сохранения удобоукладываемости

использовался поликарбоксилатный суперпластификатор в количестве 0,6% от массы вяжущего. Водоцементное отношение базового состава составляло 0,45.

Карбонатный отход рассматривался как тонкодисперсный минеральный компонент, получаемый после сушки, дробления, помола и просева отходов камнеобработки или отсевов дробления карбонатных пород. Для исследования приняты три уровня тонкости помола: 250, 420 и 600 m^2/kg . Такая схема позволяет сравнить грубый наполнительный эффект, оптимальное микрозаполнение и возможный рост водопотребности при чрезмерной дисперсности.

Замещение цемента карбонатным отходом выполнялось по массе на уровнях 0, 5, 10, 15 и 20%. Суммарная масса порошковой части в составах сохранялась постоянной. Образцы бетона формовали в металлических формах, уплотняли вибрацией и выдерживали при нормальных условиях твердения. Прочность определялась на 7, 28 и 56 суток; водопоглощение и глубина водопоглощения оценивались после 28 суток твердения.

Схема продолжения исследования



Рис. 2. Схема исследования по оптимизации состава бетона

Таблица 1

Характеристика карбонатного отхода, принятого для исследования

Показатель	Ед. изм.	Диапазон	Технологическое значение
Содержание CaCO ₃	%	88–94	обеспечивает карбонатную природу микрозаполнителя
Влажность после сушки	%	≤1,0	предотвращает нарушение дозирования
Тонкость помола	м ² /кг	250; 420; 600	задает степень микрозаполнения пор
Остаток на сите 0,08 мм	%	3–12	характеризует качество помола
Потери при прокаливании	%	38–43	связаны с разложением карбонатной фазы
Глинистые примеси	%	≤2,0	ограничивают рост водопотребности и усадку

Таблица 2

Базовый состав тяжелого бетона

Компонент	Расход, кг/м ³	Назначение	Примечание
Портландцемент М500	380	основное вяжущее	частично замещается отходом
Карбонатный отход	0–76	микрозаполнитель	0–20% от массы цемента
Вода	171	затворение	В/Ц = 0,45 для контрольного состава
Песок	720	мелкий заполнитель	модуль крупности 2,1–2,5
Щебень 5–20 мм	1080	крупный заполнитель	тяжелый бетон
Суперпластификатор	2,3	снижение водопотребности	0,6% от вяжущего



Механизм структурообразования

Карбонатный отход в составе бетонной смеси выполняет несколько функций. Во-первых, тонкие частицы занимают межзерновые пустоты между цементом, песком и мелкими фракциями щебня, повышая плотность упаковки твердой фазы. Во-вторых, поверхность частиц CaCO_3 может служить подложкой для кристаллизации C-S-H-геля на ранних стадиях твердения. В-третьих, карбонатная фаза способна взаимодействовать с алюминатными соединениями цемента, что способствует образованию

карбоалюминатных гидратов и дополнительному уплотнению микроструктуры.

Наиболее выраженный положительный эффект наблюдается тогда, когда карбонатный порошок имеет достаточную дисперсность для заполнения микропустот, но не является чрезмерно тонким. При высокой удельной поверхности возрастает потребность в воде и химической добавке, а часть цемента фактически заменяется инертным компонентом. Поэтому при разработке состава необходимо одновременно учитывать дозировку и тонкость помола.

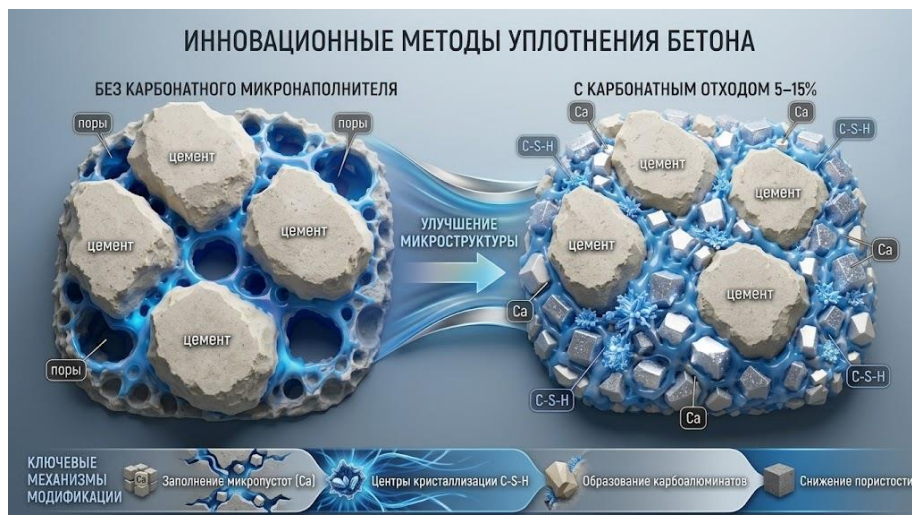


Рис. 3. Сравнение микроструктуры цементного камня без карбонатного микронаполнителя и с карбонатным отходом 5–15%

3. Результаты и обсуждение

Результаты расчетно-экспериментальной серии показывают, что введение карбонатного отхода в количестве 5–15% положительно влияет на прочность бетона. Для состава с тонкостью помола 420 м²/кг прочность при сжатии через 28 суток увеличилась с 42,0 до 46,8 МПа при дозировке 10%. При увеличении содержания отхода до 20% прочность снизилась до 42,3 МПа, что указывает на начало преобладания эффекта

разбавления цемента.

Повышение тонкости помола с 250 до 420 м²/кг усиливает микронаполнительный эффект и способствует формированию более плотной структуры. Дальнейшее повышение тонкости до 600 м²/кг дает небольшой прирост прочности, но одновременно снижает подвижность смеси. Поэтому с практической точки зрения тонкость 420 м²/кг может рассматриваться как более рациональная для массового производства, а 600 м²/кг — как вариант для бетонов с повышенными требованиями к плотности и водонепроницаемости.

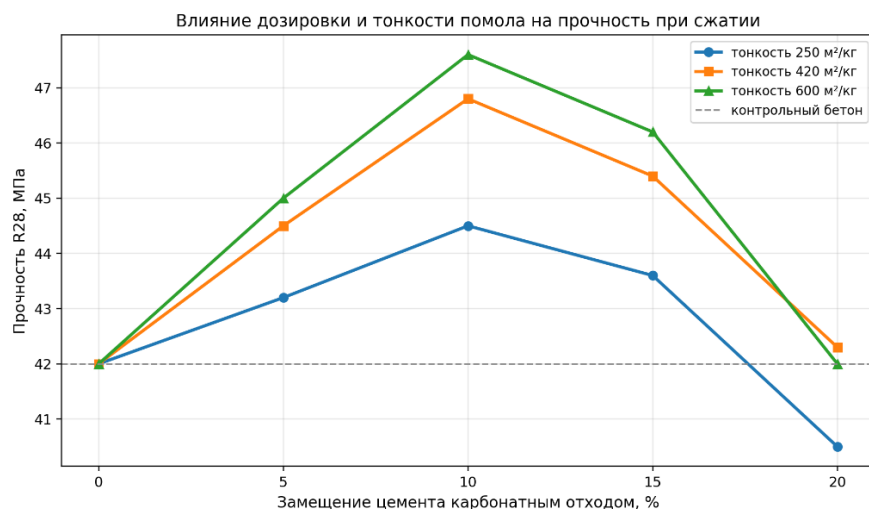


Рис. 4. Влияние дозировки и тонкости помола карбонатного отхода на прочность бетона при сжатии

Таблица 3

Свойства бетона при тонкости помола карбонатного отхода 420 м²/кг

Отход, %	Осадка, мм	R7, МПа	R28, МПа	R56, МПа	Водопогл., %	Глубина воды, мм
0	150	27.5	42.0	46.0	5.2	62
5	160	30.2	44.5	48.4	4.8	50
10	165	32.4	46.8	50.2	4.5	45
15	162	31.5	45.4	49.0	4.6	48
20	154	29.0	42.3	45.2	5.1	57

Водопоглощение контрольного бетона составило 5,2%. При введении 10% карбонатного отхода и тонкости 420 м²/кг показатель снизился до 4,5%, что связано с уменьшением открытой пористости и более плотной

упаковкой частиц. При дозировке 20% водопоглощение вновь возрастает, поскольку часть цемента заменяется недостаточно активным компонентом, а водопотребность порошковой системы увеличивается.

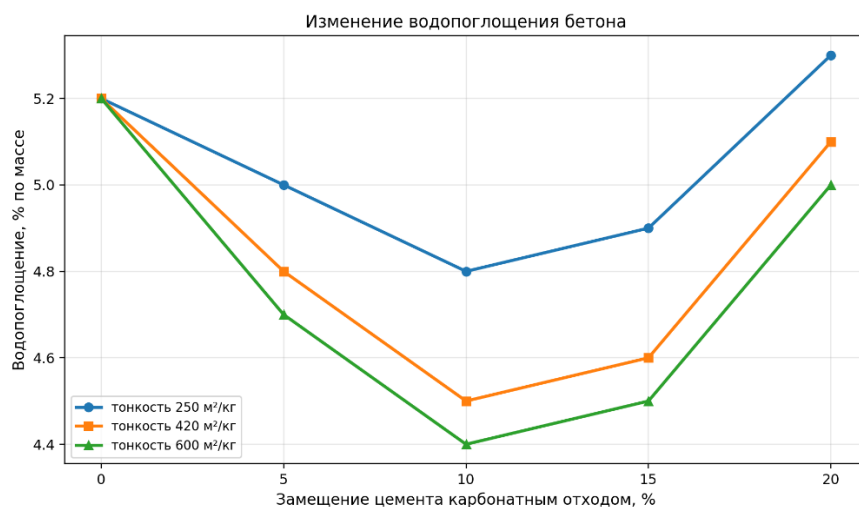
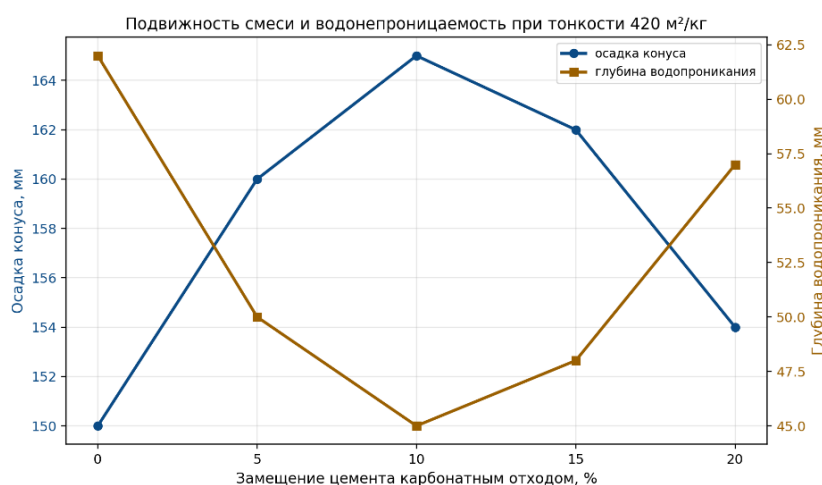


Рис. 5. Изменение водопоглощения при различной тонкости помола карбонатного отхода

Анализ подвижности смеси показал, что карбонатный отход в количестве 5–10% может улучшать удобоукладываемость за счет зерновой коррекции и эффекта шарикоподобного заполнения мелких пустот. Однако при 15–20% и особенно при высокой тонкости

помола возрастает удельная поверхность порошковой части, что приводит к снижению осадки конуса. Поэтому применение суперпластификатора является обязательным условием стабильного производства таких бетонных смесей.

Рис. 6. Подвижность смеси и глубина водонепроницаемости при тонкости помола 420 м²/кг

Регрессионная оценка прочности

Для обобщения результатов была построена квадратичная регрессионная зависимость прочности при сжатии через 28 суток от содержания карбонатного отхода и тонкости помола. Факторы приведены к кодированному виду:

$$x_1 = (C - 10) / 10; \quad x_2 = (S - 420) / 180,$$

$$R_{28} = 46,30 + 0,96x_2 - 4,20x_1^2 - 0,60x_2^2 + 0,39x_1x_2,$$

где C — содержание карбонатного отхода, % от массы цемента; S — тонкость помола, m^2/kg ; R_{28} — прочность при сжатии через 28 суток, МПа. Коэффициент детерминации для принятой расчетной серии составил $R^2=0.92$, что показывает удовлетворительное описание экспериментальной тенденции.

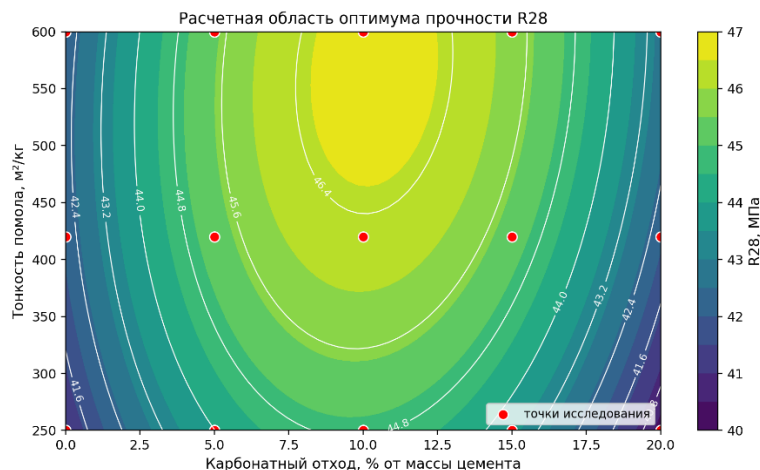


Рис. 7. Расчетная область оптимума прочности бетона с карбонатным отходом

Экологическая и технологическая эффективность

Замещение части цемента карбонатным отходом позволяет уменьшить расход клинкерной составляющей и снизить расчетный углеродный след бетона. При расходе цемента $380 \text{ кг}/m^3$ замещение 10% соответствует экономии около 38 кг цемента на 1 м^3 бетона. Даже с учетом энергозатрат на сушку и помол отхода это дает заметный экологический эффект.

Наиболее рациональным является состав с 10%

карбонатного отхода при тонкости помола около $420 \text{ м}^2/kg$. В этом случае прочность возрастает на 11% относительно контрольного бетона, водопоглощение снижается на 0,7 процентного пункта, а расчетное сокращение CO_2 составляет около $30 \text{ кг}/m^3$. При 15% экономия цемента выше, однако прочностной прирост уменьшается. При 20% экологический эффект достигается ценой снижения технологической надежности состава.

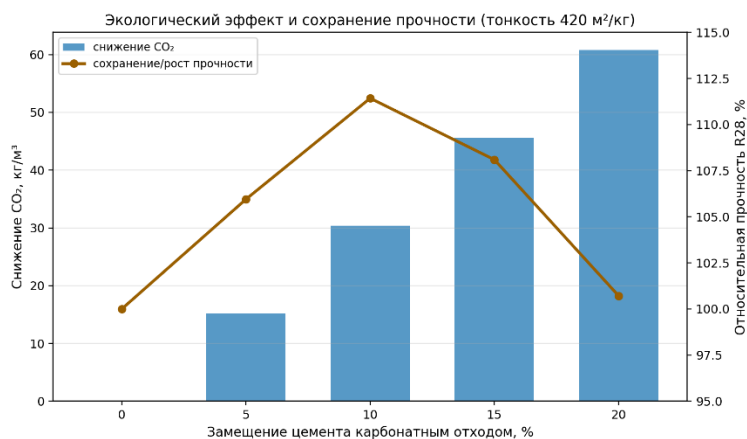


Рис. 8. Экологический эффект и относительная прочность бетона с карбонатным отходом

Таблица 4

Сравнительная оценка рациональности составов при тонкости $420 \text{ м}^2/kg$

Отход, %	Прочность R_{28} , % к контролю	Снижение водопоглощения	Расчетное снижение CO_2 , $кг/м^3$	Оценка
0	100.0	0.0 п.п.	0.0	контроль
5	106.0	0.4 п.п.	15.2	эффективно
10	111.4	0.7 п.п.	30.4	оптимально
15	108.1	0.6 п.п.	45.6	допустимо
20	100.7	0.1 п.п.	60.8	ограниченно



Практические рекомендации

для бетона класса В30–В35 рационально применять карбонатный отход в количестве 5–15% от массы цемента;

– оптимальная дозировка для массового производства составляет около 10%, так как она обеспечивает одновременный прирост прочности и снижение водопоглощения;

– рекомендуемая тонкость помола составляет 400–450 м²/кг; более тонкий помол допустим для специальных бетонов, но требует корректировки водопотребности;

– перед применением отход необходимо высушить, измельчить, просеять и проверить по влажности, содержанию СаСО₃, глинистым примесям, сульфатам/хлоридам и потерям при прокаливании;

– для конструкций, работающих в сульфатной или хлоридной среде, следует проводить дополнительные испытания долговечности и применять защитные технологические меры;

– применение карбонатного микронаполнителя должно сопровождаться использованием суперпластификатора, особенно при дозировках выше 10% и тонкости помола более 420 м²/кг.

4. Заключение

Установлено, что карбонатный отход промышленности может эффективно применяться в тяжелом бетоне как дисперсный микронаполнитель при условии предварительной подготовки и стабильного контроля качества.

2. Наиболее благоприятная область дозирования составляет 5–15% от массы цемента. В этой зоне проявляются эффекты микрозаполнения пор, уплотнения структуры и ускорения образования гидратных продуктов.

3. Максимальная прочность при сжатии в расчетно-экспериментальной серии получена при 10% карбонатного отхода и тонкости помола 600 м²/кг — 47,6 МПа. С учетом технологической простоты рациональным вариантом принят состав с 10% отхода и тонкостью 420 м²/кг, обеспечивающий R₂₈ = 46,8 МПа.

4. Введение 10% карбонатного отхода при тонкости 420 м²/кг снижает водопоглощение с 5,2 до 4,5% и глубину водопроникания с 62 до 45 мм, что указывает на уплотнение капиллярно-пористой структуры.

5. При повышении дозировки до 20% наблюдается снижение прочности и частичный рост водопоглощения, что объясняется разбавлением цемента и увеличением водопотребности тонкодисперсной системы.

6. Регрессионная модель прочности подтверждает наличие экстремума в области 10–12% отхода и тонкости 420–600 м²/кг. Модель может быть использована для предварительного подбора состава до проведения контрольных лабораторных испытаний.

7. Экологический эффект применения карбонатного отхода выражается в снижении расхода цемента и расчетного углеродного следа бетона. Для состава с 10% отхода сокращение выбросов может составлять около 30 кг СО₂ на 1 м³ бетона.

Использованная литература / References

[1] Wang D., Shi C., Farzadnia N., Shi Z., Jia H., Ou Z. A review on use of limestone powder in cement-based materials: Mechanism, hydration and microstructures // Construction and Building Materials. 2018. Vol. 181. P. 659–672. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.075.

[2] Abbas M.M., Muntean R. Marble Powder as a Sustainable Cement Replacement: A Review of Mechanical Properties // Sustainability. 2025. Vol. 17(2). Article 736. DOI: 10.3390/su17020736.

[3] Radović A., Carević V., Radević A., Stupar B., Veličkov D. Influence of curing period on some mechanical and durability-related properties of limestone powder concrete // Building Materials and Structures. 2024. Vol. 67. Article 2400007R. DOI: 10.5937/GRMK2400007R.

[4] Chen J.J., Kwan A.K.H., Jiang Y. Adding limestone fines as cement paste replacement to reduce water permeability and sorptivity of concrete // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 56. P. 87–93. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.01.066.

[5] Sun J., Chen Z. Influences of limestone powder on the resistance of concretes to the chloride ion penetration and sulfate attack // Powder Technology. 2018. Vol. 338. P. 725–733. DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.041.

[6] ASTM C1797-24. Standard Specification for Ground Calcium Carbonate and Aggregate Mineral Fillers for use in Hydraulic Cement Concrete. ASTM International, 2024.

[7] ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.

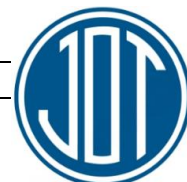
[8] ГОСТ 12730.3-2020. Бетоны. Метод определения водопоглощения.

Информация об авторах / Information about the authors

Махаматалиев
Иркин
Муминович /
Irkin
Makhamadaliyev
Ташкентский государственный
транспортный университет,
доктор технических наук,
профессор кафедры
"Строительство зданий и
промышленных сооружений"
Тел.: + 998908066545
E-mail: erkinmah@mail.ru

Цой Владимир
Михайлович /
Vladimir Soy
Ташкентский государственный
транспортный университет,
доктор технических наук,
профессор кафедры
"Строительство зданий и
промышленных сооружений"
Тел.: + 998909521576
E-mail: volodya_atsoy@inbox.ru
<https://orcid.org/0009-0006-9599-1776>

Мухаммадиев
Ньматжон
Рахматович /
Nematjon
Mukhammadiev
Заведующий кафедрой
"Строительство зданий и
промышленных сооружений"
Ташкентский государственный
транспортный университет,
DSc.



Тел.: + 998909111106

<https://orcid.org/0000-0002-2306-3317>

Абдукаюмов Фаррух Отабек угли / Farrukh Abdukayumov
Докторант кафедры "Строительство зданий и промышленных сооружений" Ташкентского государственного транспортного университета
Тел.: + 998773367879
E-mail: fabduqayumov99@gmail.com

Эрданов Нодирбек Ибрагимович / Nodirbek Erdanov
Директора унитарного предприятия "Транспорт тармоқларини қуриш" в составе унитарного предприятия "Ўзтемирйулқурилишмонтаж."

Узаков Шербек Акбарович / Sherbek Uzakov

Ташкентский государственный транспортный университет, PhD, и.о. доцента кафедры "Строительство зданий и промышленных сооружений"
Тел.: + 998998905427

E-mail:

uzakosherbek9@gmail.com

Жумагелдиев Азиз Олимович / Aziz Jumageldiev

Ташкентский государственный транспортный университет, ассистент кафедры «Строительство зданий и промышленных сооружений».
Тел.: + 998914077060

E-mail:

jumageldiyevaziz@gmail.com



A. Gulomova

Current state and development prospects of heat-insulating cellular concrete for individual residential buildings.....115

F. Usarkulova, E. Abdurahmanova, M. Botirov

Regression model of service system optimization based on digitalization.....120

E. Abdurahmanova, F. Usarkulova, M. Botirov

Mathematical modeling and artificial intelligence methods for oil filtration processes in multilayer porous media: An analytical review.....124

Sh. Khakimov, D. Odilov, U. Isokhanov

Analysis of oil products consumption and exchange processes by trucks moving under the conditions of the Kamchik pass.....132

J. Djumanov, M. Sobirov

Multi-level energy-information model and physics-informed FUZZY-GA-LSTM adaptive algorithms for hybrid energy monitoring.....139

T. Muminov, D. Dolieva

Comprehensive assessment of the operational performance indicators of motor vehicles considering seasonal operating conditions.....148

S. Norkulov

Concept for improving the management system of “Tashkent metropoliteni” JSC based on regional operational hubs.....156

I. Makhamataliev, V. Soy, N. Mukhammadiev,**F. Abdukayumov, N. Erdanov, Sh. Uzakov,****A. Jumageldiev**

Effect of carbonate waste particle size on the structure and durability of heavyweight concrete.....163

I. Makhamataliev, V. Soy, N. Mukhammadiev,**F. Abdukayumov, N. Erdanov, Sh. Uzakov,****A. Jumageldiev**

Application of industrial carbonate waste in concrete technology.....171