

На правах рукописи

ГОРШКОВ АЛЕКСАНДР СЕРГЕЕВИЧ

**БЕТОНЫ, МОДИФИЦИРОВАНИЕ ДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре технологий строительства и конструкционных материалов инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

Научный руководитель:

Малькова Марианна Юрьевна,
доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры машиностроительных технологий
инженерной академии ФГАОУ ВО
«Российский университет дружбы народов
имени Патриса Лумумбы»

Официальные оппоненты:

Стельмах Сергей Анатольевич,
доктор технических наук, доцент, заведующий
кафедрой «Строительство уникальных зданий
и сооружений» факультет промышленного и
гражданского строительства ФГБОУ ВО
«Донской государственный технический
университет»

Харун Махмуд, кандидат технических наук,
доцент, доцент кафедры «Железобетонные и
каменные конструкции» институт
промышленного и гражданского строительства
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Московский государственный строительный
университет»

Ведущая организация:

Комплексный научно-исследовательский
институт имени Х. И. Ибрагимова
Российской академии наук (КНИИ РАН),
г. Грозный

Защита диссертации состоится 29 декабря 2025 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета ПДС 2022.015 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» по адресу: г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3., ауд. 208

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 6.

Электронная версия автореферата и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте РУДН: <https://www.rudn.ru/science/dissovet> и отправлены для размещения на официальном сайте ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ по адресу: <https://vak.gisnauka.ru/>

Автореферат разослан 26.11.2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета ПДС 2022.015,
кандидат технических наук

Виноградова Е.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Развитие технологий гражданского строительства обусловило постоянно нарастающую потребность в высокоэффективных строительных материалах, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками – такими, как: прочность на сжатие и растяжение, сопротивление усталостному разрушению, долговечность, ударная вязкость и другие важные параметры.

Одними из наиболее распространенных инженерных материалов, широко используемых в строительной отрасли, являются бетоны. При этом в состав современных бетонов активно включаются минеральные, химические вещества и волокнистые материалы, а также дисперсные частицы и наноматериалы, присутствие которых в рецептуре современных бетонов способствует заполнению микро- и нанопор матрицы, обеспечивая улучшение механических и эксплуатационных свойств бетонных смесей. Кроме того, дисперсные частицы выступают модификаторами, способствующими образованию дополнительных центров гидрата силиката кальция (C-S-H), отвечающего за прочность бетона.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам модифицирования бетонов посвящены многочисленные работы отечественных и зарубежных ученых, таких как: Потапов В.В., Гончарова Н.С., Муртазаев С.А.Ю., Лукутцова Н.П., Стельмах С.А., Пономарев А.Н., Ключев С.В., Коротких Д.Н., Артамонова О.В., Чернышов Е. М., Тимашев В.В., И.И. Сычев И.И., Никонова Н.С., Баженов, Ю. М., Said, A. M., Zhang, P., Jo, B. W., Noorvand, H., Chithra, S., Mehta, P. K., Kishore, R., Varghese, L., Chahal, N., Zhao, S., Wang, J.X., Khaloo, A., Bonavetti, V., Kumar, A., Hemalatha, P., Sanchez, F., Li, H., Alhawati, M., Huseien, G. F., Morsy, M.S., Mohamed, A.M., Chen, J. Основные направления исследований в данной области охватывают применение нанодисперсных частиц в качестве модификаторов бетона. При этом установлено, что, несмотря на положительный эффект применения наномодификаторов, производство наноразмерных материалов сопряжено с рядом технологических сложностей и высокими экономическими затратами.

В связи с этим в последнее время предпочтение отдается модификаторам, полученным из промышленных и сельскохозяйственных отходов. Это позволяет не только снизить стоимость добавок, но и минимизировать негативное воздействие промышленности на окружающую среду.

Однако, малоизученными, но актуальными, являются вопросы применения отходов производства строительных материалов в качестве модификаторов бетона, что обусловило выбор темы диссертационного исследования.

Объектом настоящего исследования являются бетоны, модифицированные дисперсными порошками (ДП), полученными из строительных отходов (бой кирпичей).

Предмет исследования – модифицирующий эффект и механические свойства бетонов, полученных с использованием ДП строительных отходов (СО).

Целью диссертационной работы является исследование механических свойств бетонов, модифицированных дисперсными порошками строительных отходов (ДПСО).

Для достижения поставленной цели в рамках диссертационного исследования были решены следующие задачи:

- получение методом измельчения строительных отходов порошков дисперсной и ультрадисперсной крупности (ДП и УДП), изучение их гранулометрического и химического составов;
- определение оптимальных параметров измельчения строительных отходов при получении частиц дисперсной и ультрадисперсной крупности;

- установление зависимостей между механическими характеристиками бетонов, полученных модифицированием ДПСО, и гранулометрическим составом модификаторов;
- разработка рецептур бетонных смесей, содержащих в качестве модифицирующей добавки ДПСО, отвечающих требованиям по прочности и долговечности конструкций;
- исследование прочности и модуля упругости бетонов, модифицированных ДПСО;
- разработка оптимальных составов бетонных смесей, модифицированных ДПСО;
- исследование микроструктуры и химического состава полученных образцов бетона;
- расчет элементов конструкции типового здания, изготовленных с использованием разработанных бетонов.

Методология и методы исследования. Методологическая основа экспериментальных исследований включает применение современных методов определения физико-химических характеристик и гранулометрического состава порошков, используемых в качестве дисперсных модификаторов бетона; а также химического состава и механических свойств бетонных образцов. Обработка результатов экспериментальных исследований выполнена с использованием методов регрессионно-корреляционного анализа.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием стандартных методик испытаний; методов рентгенофазового, спектрального и ультразвукового анализа исходных компонентов бетонной смеси и готовых образцов; применением аттестованного испытательного оборудования; необходимым количеством проведенных экспериментов для обеспечения адекватности полученных результатов.

Научно-техническая гипотеза исследования основывается на предположении о возможности улучшения механических характеристик бетона, модифицированного ДП строительных отходов.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения ДП, полученных измельчением строительных отходов, в качестве модифицирующей добавки в технологиях изготовления бетонов с повышенными механическими характеристиками. Установлено, что включение ДПСО в традиционные рецептуры бетона обеспечивает улучшение его физико-механических свойств.
2. Исследованы кинетические характеристики процесса измельчения строительных отходов при получении порошков-модификаторов дисперсной фракции. Установлено, что константа скорости измельчения варьируется в диапазоне $0,041 - 0,242 \text{ мин}^{-1}$, что указывает на общий характер закономерностей измельчения для всех исследованных материалов.
3. Установлены зависимости между гранулометрическим, химическим составом дисперсных порошков-модификаторов и механическими характеристиками бетонов, изготовленных с их использованием. Показано, что фракция ДПСО крупностью $-0,026+0 \text{ мм}$ характеризуется стабильностью гранулометрического и химического составов.
4. Разработаны и изучены составы бетонных композиций, содержащих ДПСО фракцией $-0,026+0 \text{ мм}$ в концентрациях 10-50 % от массы цемента. Установлено, что введение ДПСО в состав бетонной смеси способствует оптимизации структуры бетонных композиций на микро- и макроуровнях, что сопровождается повышением прочностных и упругих характеристик материала.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Проведена оптимизация регулируемых технологических параметров измельчения строительных отходов для получения порошков дисперсной и ультрадисперсной фракции.

2. Показано, что составы, содержащие ДПСО, обеспечивают повышение прочности бетонов на сжатие на 13,9-59,8 %, модуля упругости – на 55,3-88,0 % по сравнению с бетонами, изготовленными по традиционной технологии.

3. Определены оптимальные концентрации модифицирующих дисперсных порошков (20 % ДПСО от массы цемента), обеспечивающих бетону максимальные показатели прочности на сжатие и модуля упругости (46,112 МПа и 51,7 ГПа, соответственно).

4. Показано, что применение бетонов с модифицирующей добавкой из ДПСО позволяет уменьшить процент армирования железобетонных конструкций по сравнению со стандартным проектом. Экономический эффект от замены бетона класса В22,5 на бетон, модифицированный ДПСО, составит 33% для плит перекрытия и 25 % для колонн.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты определения оптимального фракционного размера модифицирующей добавки к бетону.

2. Результаты исследований химического и гранулометрического состава полученных ДП и УДП.

3. Результаты исследований кинетики процесса измельчения строительных отходов с получением порошков дисперсной и ультрадисперсной фракции.

4. Результаты определения оптимальных технологических параметров процесса измельчения строительных отходов при получении порошков дисперсной и ультрадисперсной фракции.

5. Результаты экспериментального исследования механических характеристик бетонов, содержащих в качестве модифицирующей добавки ДПСО.

6. Разработанные составы и свойства бетонных смесей, содержащих в качестве модификаторов ДПСО.

Соответствие паспорту специальности. Диссертация соответствует паспорту специальности 2.1.5. «Строительные материалы и изделия» в части: п. 5 – Разработка и внедрение способов активации компонентов строительных смесей путем использования физических, химических, механических и биологических методов, способствующих получению строительных материалов с улучшенными показателями структуры и свойств; п. 9 – Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений.

Апробация работы. Материалы диссертации доложены и обсуждены в период с 2020 по 2025 годы на 5 научно-технических конференциях и семинарах:

Личный вклад автора. Вклад автора заключается в постановке и реализации задач диссертационной работы, анализе литературных данных, выборе методики исследования, в подготовке программы экспериментальных испытаний, проведении экспериментов и получении результатов исследования, обработке и анализе данных проведенных численных расчетов и экспериментальных исследований, оформлении материалов публикаций.

Публикации. Основные научные положения работы, методики и экспериментальные результаты изложены в 8 научных публикациях, в том числе 3 – в рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science; 3 публикации – в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит введение, 5 глав и выводы, изложена на 187 страницах машинописного текста, содержит 58 таблиц и 76 рисунков. Библиография включает 357 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность разрабатываемой проблемы, определены основные задачи и цели работы; изложены защищаемые положения и новизна результатов исследования.

В первой главе представлен критический анализ научной литературы, соответствующей тематике диссертационной работы. В последние годы довольно широко практикуется применение порошков дисперсной и ультрадисперсной фракции в качестве модификаторов в составе бетонных смесей. При этом установлено, что их использование сопряжено с технологическими трудностями, связанными с получением и хранением материала, а также высокой стоимостью готовых порошков. Показано, что частичным устранением возникших трудностей является привлечение в качестве модификаторов бетонных смесей строительных отходов (бой кирпича и др.). Такой подход не только снижает стоимость модификатора, но и способствует решению ряда экологических проблем, связанных с утилизацией вторичного сырья.

Рассмотрены ключевые направления исследований и задачи, связанные с интеграцией строительных отходов в состав бетонных смесей. Отмечено, что дисперсные порошки, полученные из кирпичного боя, относятся к пуццолановым материалам. Их включение в состав бетонных смесей повышает прочностные характеристики готового бетона.

Вторая глава содержит описание методического обеспечения исследований. Экспериментальная часть работы выполнена с использованием методов исследований, регламентированных ГОСТ. Детально описаны методики получения дисперсных порошков; исследования гранулометрического и химического составов строительных отходов и продуктов их измельчения; а также изготовления и испытания образцов бетона, модифицированного дисперсными порошками. Обработка экспериментальных данных на ЭВМ выполнена с применением регрессионно-корреляционного анализа.

Третья глава диссертации посвящена исследованию эффективности процесса получения дисперсных порошков (модификаторов бетона) путем механического измельчения. При этом в качестве исходных материалов использовали образцы строительных отходов (кирпичный бой) трех марок кирпича: облицовочного Браер 0,7 NF (образец №1) и М 200 1NF (образец №3) и шамотного ШБ-5 (образец №2).

Основными задачами проводимого исследования являлись изучение:

- изменения гранулометрического и химического составов материалов с выявлением оптимальных фракционных размеров ДП;
- кинетики измельчения ДП с последующей оптимизацией регулируемых параметров.

Гранулометрический и химический составы ДП

Основным критерием качества дисперсных модификаторов является стабильность их химического и гранулометрического состава. ДП строительных материалов содержат в своем составе большое количество химических компонентов, каждый из которых характеризуется собственными закономерностями измельчения. В связи с этим основной задачей получения порошков-модификаторов является обеспечение стабильности их химического и гранулометрического составов.

Измельчение кирпичного боя в шаровой мельнице

Измельчение кирпичного боя вели в шаровой мельнице типа WiseMix BML-2. Сравнительный анализ химического состава ДП после измельчения в шаровой мельнице (таблица 1) показал существенные различия химических составов выделенных

гранулометрических фракций одного и того же диспергируемого образца, что обусловлено различием прочностных характеристик компонентов измельчаемой смеси.

Таблица 1. Химический состав (%) ДП после 20, 30, 45 и 60 минут измельчения.

Размер фракции, мм	Содержание во фракции, % (образец 1/образец 2/образец 3)					
	Al	Si	Ca	Fe	K	Пр.
Время измельчения – 20 минут						
-0,315+0,08	12,2/27,3/5,7	54,2/50,2/62,6	1,4/1,2/2,3	18,6/14,4/18,2	5,4/3,3/8,0	8,2/3,8/3,2
-0,08+0,045	4,6/31,8/11,5	57,3/47,8/61,4	1,5/1,2/1,1	21,3/12,7/15,2	5,9/3,3/7,3	9,4/3,4/3,5
-0,045+0,026	7,2/23,2/4,5	55,8/51,7/63,1	1,5/1,4/2,3	20,1/15,9/18,4	5,7/4,5/8,2	9,7/3,3/3,5
-0,026+0	0,1/16,7/4,4	57,4/55,0/63,0	1,7/1,6/2,1	22,4/18,4/16,1	6,0/4,4/7,4	12,4/3,9/7,0
Время измельчения – 30 минут						
-0,315+0,08	9,7/5,5/4,3	56,8/63,7/63,0	1,3/1,2/2,3	18,8/14,4/18,8	5,2/8,1/8,7	8,2/7,1/2,9
-0,08+0,045	9,0/27,3/5,1	62,1/50,2/63,0	2,0/1,2/2,1	16,6/14,5/17,1	7,7/3,4/8,2	2,6/3,4/4,5
-0,045+0,026	8,4/25,6/6,9	61,6/51,5/63,6	2,0/1,3/2,0	17,4/16,1/17,0	6,8/3,6/7,6	3,8/1,9/2,9
-0,026+0	7,7/21,3/7,3	62,6/50,8/63,8	2,1/1,4/1,9	17,9/18,3/16,3	5,7/3,7/8,0	4,0/4,5/2,7
Время измельчения – 45 минут						
-0,315+0,08	12,3/25,6/4,3	53,3/51,5/62,6	1,3/1,2/2,2	19,7/14,5/19,2	5,2/3,9/8,4	8,2/3,3/3,3
-0,08+0,045	3,0/25,0/7,0	57,6/52,6/61,1	1,5/1,1/2,1	22,5/14,4/18,0	5,9/3,6/8,2	9,5/3,3/3,6
-0,045+0,026	7,8/23,7/12,6	56,8/51,2/61,3	1,4/1,3/1,8	20,4/16,4/14,8	5,3/3,7/6,2	8,3/3,7/3,3
-0,026+0	7,2/20,9/10,4	54,2/51,6/61,0	1,4/1,4/1,7	22,8/18,2/16,1	5,6/4,0/7,2	8,8/3,9/3,6
Время измельчения – 60 минут						
-0,315+0,08	8,2/28,6/25,0	58,0/48,4/54,1	1,3/1,2/1,4	20,3/14,9/10,4	5,8/3,7/5,6	6,4/3,2/3,5
-0,08+0,045	11,9/34,1/27,3	61,1/48,1/54,0	1,2/1,1/1,3	15,9/11,0/9,6	4,7/3,1/5,1	5,2/2,6/2,7
-0,045+0,026	11,5/24,7/24,2	60,1/53,3/57,5	1,5/1,1/1,1	16,2/14,1/9,2	5,9/3,8/5,1	4,8/3,0/2,9
-0,026+0	11,3/23,8/18,4	58,8/54,0/62,1	1,3/1,1/1,8	18,0/14,1/8,5	4,8/3,7/5,3	5,8/3,3/3,9

Измельчение кирпичного боя в планетарной мельнице

Измельчение кирпичного боя до фракции ультрадисперсных размеров (УДП) вели в планетарной мельнице типа РМ-400. При этом исходным материалом служила фракция ДП крупностью $-0,026+0$ мм. Выбор данной фракции обусловлен стабильностью гранулометрического и химического составов всех промежуточных фракций (таблицы 2 – 4).

Таблица 2. Изменение гранулометрического состава фракции $-0,026+0$ мм после измельчения в планетарной мельнице.

Размер, фракции, мкм	Выход фракции, %		
	УДП образца №1	УДП образца №2	УДП образца №3
– 20,000 + 10,00 0	0,01	0,00	0,00
– 10,000 + 5,000	10,16	10,02	10,3
– 5,000 + 4,000	8,44	8,62	8,91
– 4,000 + 3,000	11,38	12,53	12,97
– 3,000 + 2,000	20,73	20,66	20,44
– 2,000 + 1,000	29,69	29,27	28,32
– 1,000 + 0,050	16,59	18,89	19,06

Таблица 3. Химический состав ДП до измельчения в планетарной мельнице.

Содержание компонентов, %	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Сумма
ДП образца №1	0,6	1,0	12,0	59,0	3,2	1,2	1,2	6,1	15,8	100
ДП образца №2	0,2	0,4	37,7	46,5	1,9	0,8	2,1	0,0	10,4	100
ДП образца №3	0,9	1,2	15,4	61,7	4,2	1,5	1,4	0,4	13,2	100

Таблица 4. Химический состав УДП после измельчения в планетарной мельнице.

Содержание компонентов, %	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Сумма
УДП образца №1	0,6	0,9	11,4	60,9	3,0	1,0	1,1	4,3	16,8	100
УДП образца №2	0,0	0,5	38,6	47,9	1,6	0,7	2,1	0,0	8,6	100
УДП образца №3	0,8	1,1	14,2	63,0	3,9	1,2	1,5	0,4	14,0	100

Кинетика процесса измельчения кирпичного боя

На рис. 1-3 представлены результаты изучения кинетики процесса измельчения кирпичного боя, указывающие на линейный характер зависимости скорости процесса измельчения от времени. При этом установлено, что константы скоростей данного процесса изменяются в пределах (мин^{-1}) от 0,0011 до 0,003 в зависимости от прочностных характеристик материала.

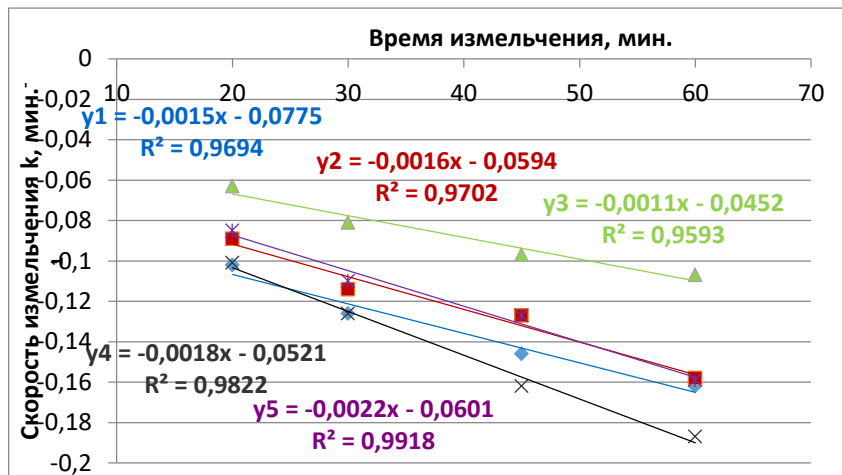


Рисунок 1. Зависимость коэффициента скорости измельчения образца №1 от длительности измельчения. Условия измельчения: y_1 – 600 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 11,90; y_2 – 600 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 8,26; y_3 – 300 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 4,26; y_4 – 600 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 7,87; y_5 – 600 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 6,21

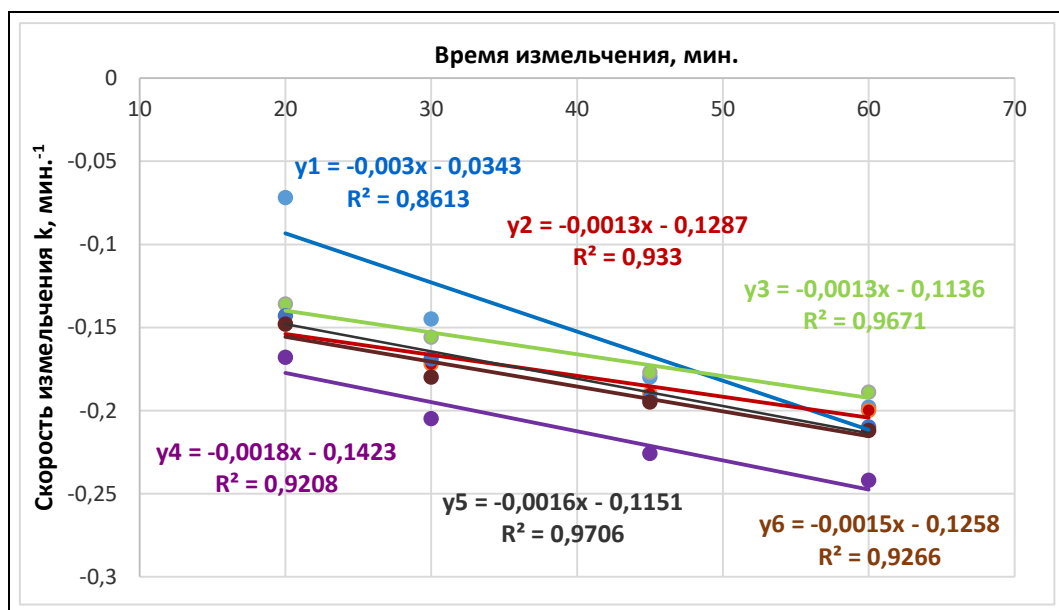


Рисунок 2. Зависимость коэффициента скорости измельчения образца №2 от длительности измельчения. Условия измельчения: y_1 – 600 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 5,88; y_2 – 300 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 5,95; y_3 – 300 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 4,26; y_4 – 300 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 8,26; y_5 – 450 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 4,26; y_6 – 450 об./мин., $M_{\text{ш}}/M_3$ – 8,55

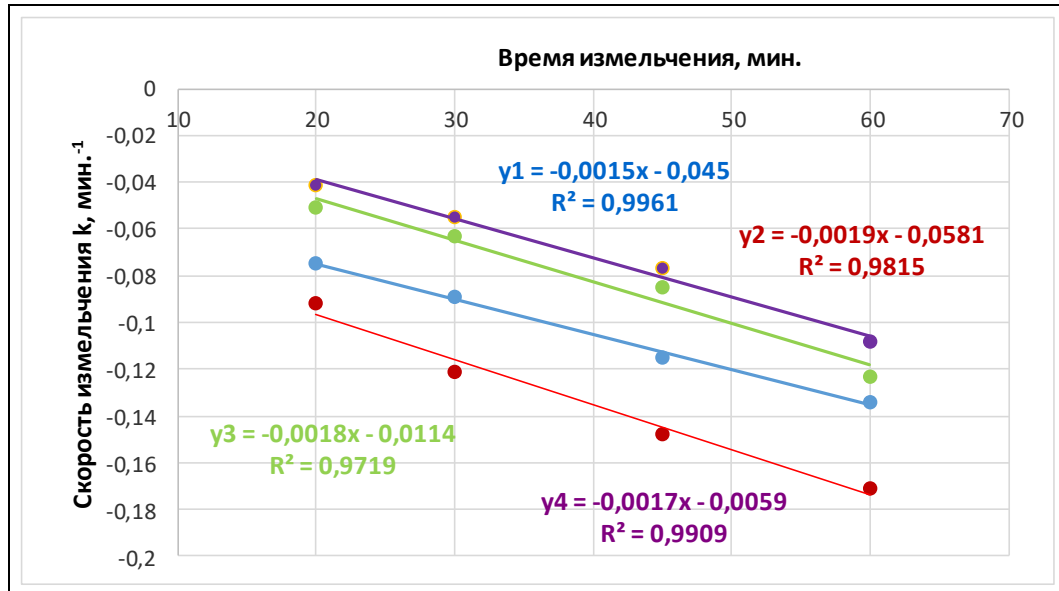


Рисунок 3. Зависимость коэффициента скорости измельчения образца №3 от длительности измельчения. Условия измельчения: y_1 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 5,88; y_2 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 7,87; y_3 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 5,95; y_4 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 4,46

Выход фракции ДП крупностью $-0,026+0$ мм при измельчении кирпичного боя

Для оценки выхода фракции ДП крупностью $-0,026+0$ мм при измельчении кирпичного боя провели серию систематических экспериментов. При этом в качестве регулируемых параметров выбрали: скорость вращения мельницы (V_m) – 300-600 оборотов в минуту, продолжительность измельчения (t) – 20-60 минут и соотношение масс шаровой загрузки и измельчаемого материала ($M_{ш}/M_3$) – 4,26-11,9. Анализ полученных экспериментальных зависимостей (рисунки 4 – 6) показал, что их характер может быть описан функцией вида:

$$f(Y_i) = k_i \ln X_i + B_i,$$

где $k_1, k_2 \dots k_n$ – константы измельчения материала; X_i – регулируемые параметры процесса измельчения; $B_1, B_2 \dots B_n$ – постоянные процесса логарифмирования.

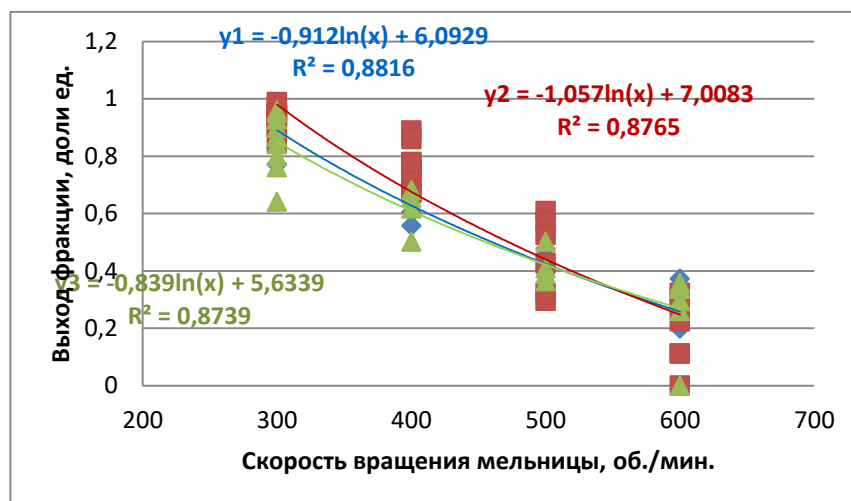


Рисунок 4. Экспериментальная зависимость выхода ДП фракции ($-0,026+0$ мм) от скорости вращения мельницы: y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

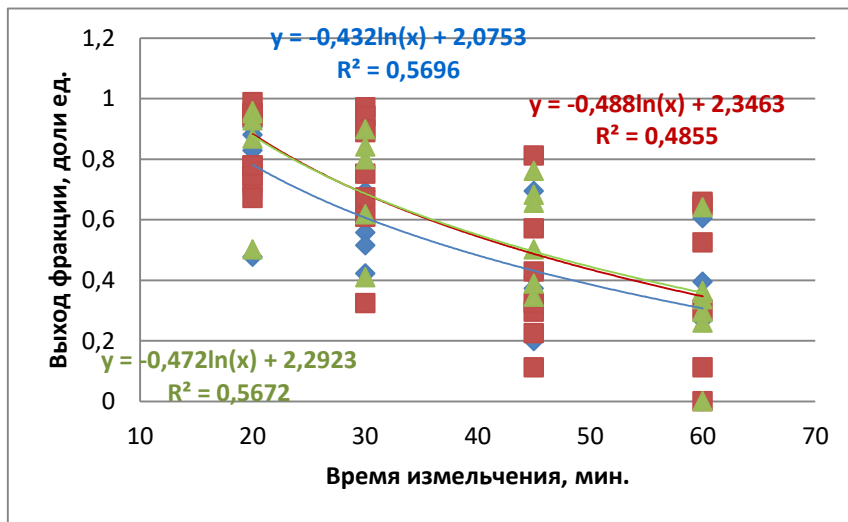


Рисунок 5. Экспериментальная зависимость выхода ДП фракции (-0,026+0 мм) от времени измельчения:
 y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

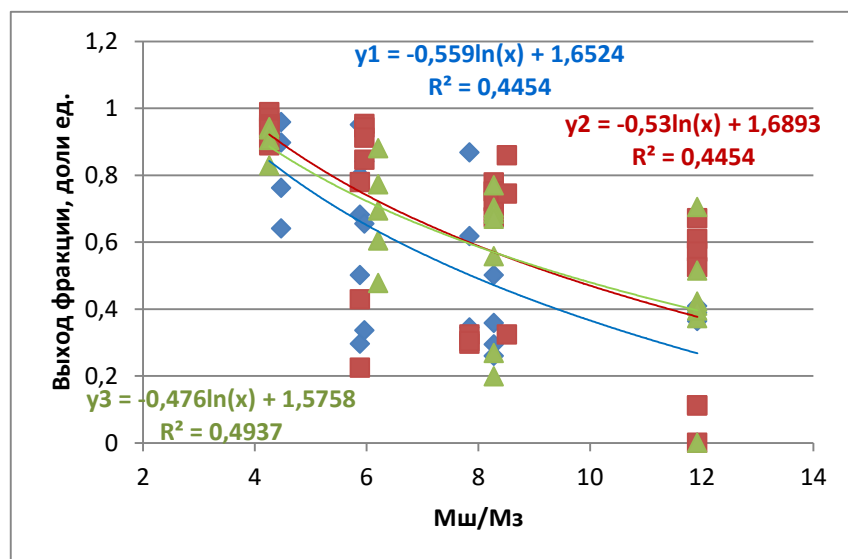


Рисунок 6. Экспериментальная зависимость выхода ДП фракции (-0,026+0 мм) от отношения массы мелющих тел к массе измельчаемых материалов ($M_{ш}/M_z$):
 y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

Для обработки экспериментальных данных использовали метод Брандона. Результаты обработки данных представлены в таблице 2, где X_1 – скорость вращения мельницы, об/мин.; X_2 – время измельчения, мин.; X_3 – соотношение масс шаровой загрузки и измельчаемого материала; α – уточняющий коэффициент модели; R^2 – коэффициент детерминации; $F_{эксп}$ – экспериментальный критерий Фишера.

Таблица 2. Обработка экспериментальных данных.

Вид уравнения	k_i	B_i	α	R^2	$F_{\text{эсп.}}$
<i>Образец 1</i>					
$f(X_1) = -0,91\ln(X_1)+6,092$	-0,91	6,092	$4,7536 \cdot 10^{-7}$	0,881	49,356
$f(X_2) = -0,43\ln(X_2)+2,075$	-0,43	2,075	0,007123	0,569	8,801
$f(X_3) = -0,476\ln(X_3)+1,576$	-0,476	1,576	0,020338	0,445	6,253
<i>Образец 2</i>					
$f(X_1) = -1,09\ln(X_1)+7,215$	-1,09	7,215	$1,008 \cdot 10^{-8}$	0,881	64,16246
$f(X_2) = -0,52\ln(X_2)+2,455$	-0,52	2,455	0,006086	0,504	8,80645
$f(X_3) = -0,53\ln(X_3)+1,689$	-0,53	1,689	0,014753	0,445	6,75445
<i>Образец 3</i>					
$f(X_1) = -0,83\ln(X_1)+5,633$	-0,83	5,633	$0,84 \cdot 10^{-6}$	0,873	45,82677
$f(X_2) = -0,47\ln(X_2)+2,292$	-0,47	2,292	0,007324	0,567	8,72979
$f(X_3) = -0,559\ln(X_3)+1,652$	-0,559	1,652	0,030523	0,494	5,34534

Аппроксимацией экспериментальных данных получены математические модели, описывающие зависимость доли выхода фракции ДП -0,026+0 мм от регулируемых технологических параметров (таблица 3).

Таблица 3. Математические модели процесса измельчения образцов строительных отходов.

Номер образца	Вид математической модели
1	$f(X_1, X_2, X_3)=0,9999 \cdot (-0,91\ln(X_1)+6,092) \cdot (-0,194\ln(X_2)+1,629) \cdot (-0,011\ln(X_3)+0,977)$
2	$f(X_1, X_2, X_3)=0,9999 \cdot (-1,09\ln(X_1)+7,215) \cdot (-0,153\ln(X_2)+1,505) \cdot (-0,057\ln(X_3)+1,112)$
3	$f(X_1, X_2, X_3)=0,9991 \cdot (-0,83\ln(X_1)+5,633) \cdot (-0,21\ln(X_2)+1,665) \cdot (-0,279\ln(X_3)+1,54)$

Для определения оптимальных значений регулируемых параметров измельчения была выполнена математическая обработка экспериментальных данных с использованием метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Полученные расчетные зависимости эффективности измельчения от регулируемых технологических параметров демонстрируют высокую степень корреляции с экспериментальными данными.

Установлено, что для обеспечения стабильного модифицирующего эффекта порошковой добавки, ее химического и гранулометрического составов достаточно, чтобы ее крупность не превышала 0,026 мм. Выявленные оптимальные значения регулируемых параметров процесса измельчения (X_1 – 600 об./мин., X_2 – 60 минут, X_3 – 11,92) обеспечивают выход фракции -0,026 + 0 мм в количестве 77-78% от массы загруженного материала. При этом наиболее значимым параметром является скорость вращения барабана мельницы. Вторым по значимости фактором, влияющим на степень дисперсности получаемых материалов, является продолжительность процесса помола. Наименьший вклад в эффективность процесса вносит параметр, характеризующий соотношение масс мелющих тел и загруженного материала.

Анализ закономерностей измельчения показал, что они имеют общий характер для всех исследованных материалов, что подтверждает возможность их применения к различным типам строительных отходов.

В четвертой главе содержатся результаты экспериментальных исследований механических характеристик бетона, модифицированного ДПСО.

При этом основными задачами являлось:

- составление бетонных смесей, модифицированных ДПСО, исследование прочностных и упругих свойств полученных бетонов;
- установление зависимостей между механическими характеристиками бетонов, полученных модифицированием ДП и гранулометрическим, химическим составом модификатора;
- разработка оптимальных составов бетонных смесей, модифицированных ДПСО;
- исследование микроструктуры и химического состава полученных образцов бетона.

Получение и испытание бетонов, модифицированных ДП

Для оценки эффективности модифицирования бетона дисперсными порошками были разработаны и протестированы различные составы бетонов, содержащих ДП наиболее стабильной по химическому и гранулометрическому составу фракции $-0,026+0$ мм.

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 были изготовлены и испытаны на прочность бетонные образцы в форме куба с длиной ребер 70 мм. В ходе испытаний использовались три разновидности дисперсных порошков – ДП образца №1 (ДП №1), ДП образца №2 (ДП №2) и ДП образца №3 (ДП №3).

Результаты проведенных экспериментов представлены на рисунках 7-9. Анализ полученных данных показывает, что прочность бетона на сжатие возрастает с увеличением времени выдержки для всех составов и процентных содержаний модифицирующих добавок (ДП). Установлено, что выдержка образцов в течение 28 дней приводит к максимальному упрочнению бетона, причем для образцов всех типов.

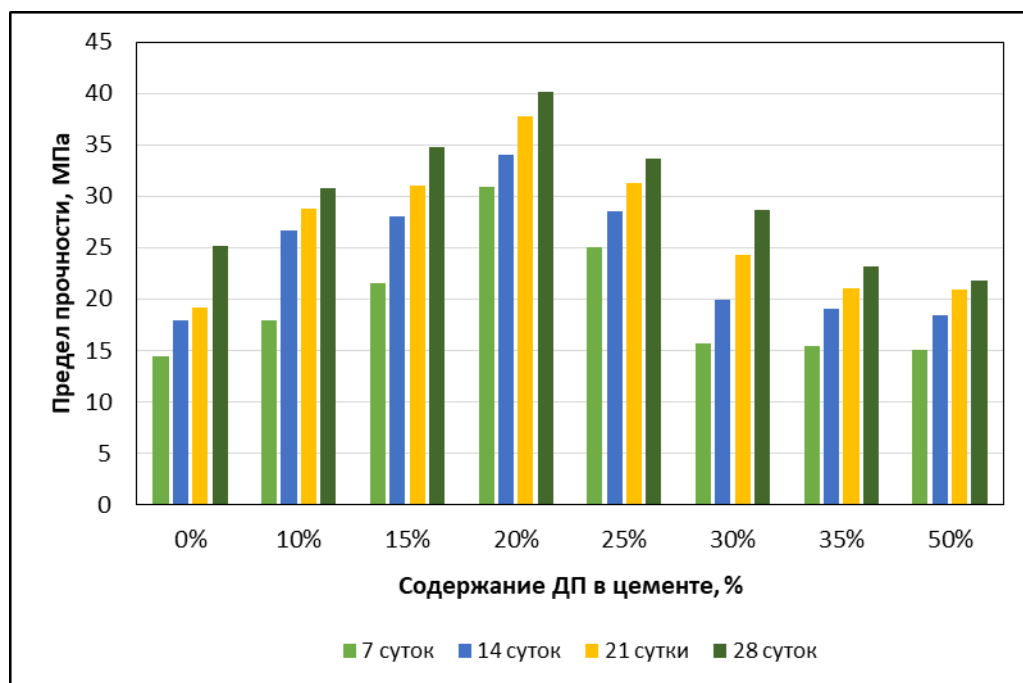


Рисунок 7. Результаты испытаний на сжатие образцов бетона с добавлением ДП №1

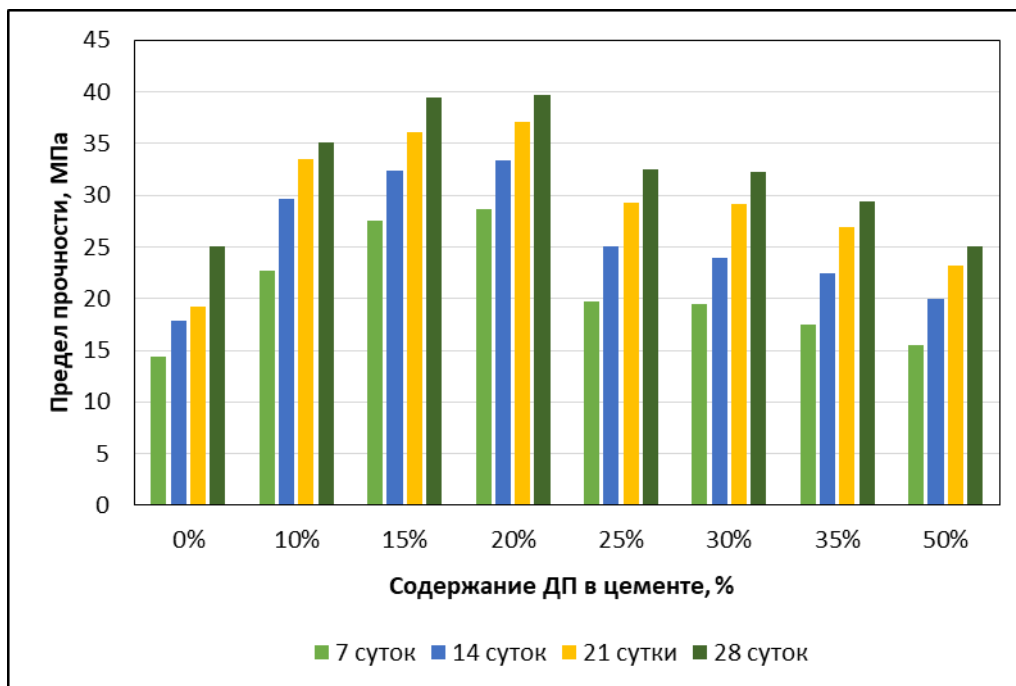


Рисунок 8. Результаты испытаний на сжатие образцов бетона с добавлением ДП №2

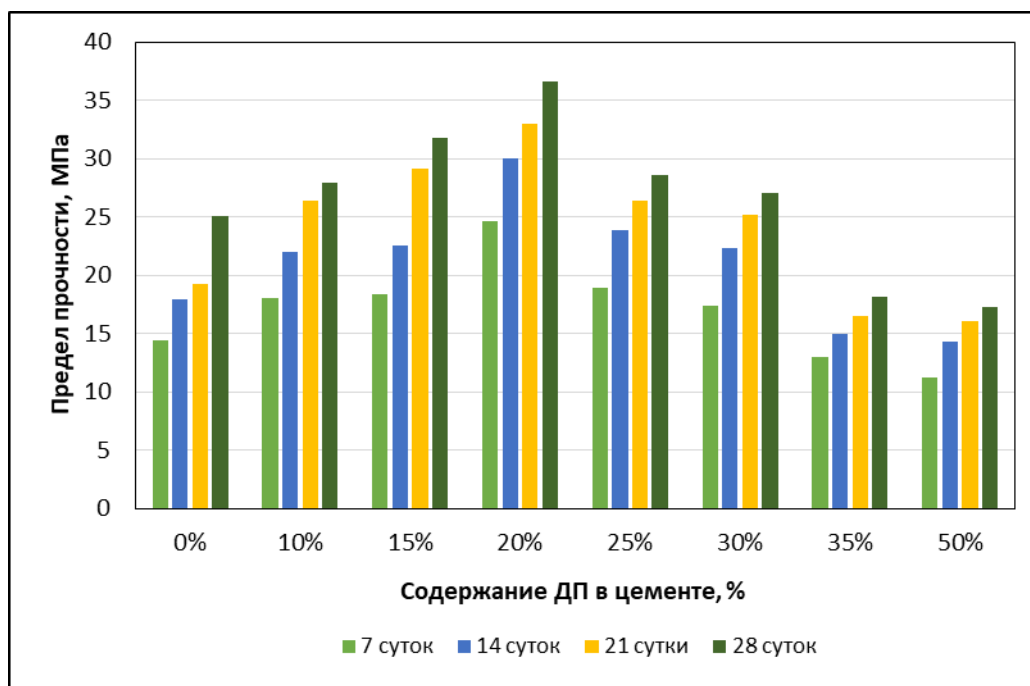


Рисунок 9. Результаты испытаний на сжатие образцов бетона с добавлением ДП № 3

Результаты испытаний бетонных образцов на сжатие после 28 суток твердения при различных концентрациях модифицирующих добавок продемонстрировали достижение максимальных показателей прочности бетона по сравнению с контрольным образцом при содержании 20 % ДП. В частности, увеличение на 59,8% для образца №1; 58,1% для образца №2 и 45,96 % для образца №3. Показано, что при содержании ДП (%): 10, 25, 30 и 35 прочность бетона повышается незначительно, а при 35 % и более ДП приводит к снижению прочностных характеристик.

В рамках исследования проведены испытания бетонных образцов на упругость. Установлено, что лучшие показатели модуля упругости демонстрирует образец бетона, модифицированный ДП №1. Относительный прирост модуля упругости для этого образца по сравнению с контрольным составил 67,5-88,0 %. Добавление к цементу модификаторов типа

ДП №2 и ДП №3 обеспечило повышение модуля упругости на 42,65–76,5 % и 44,5–73,96 %, соответственно. При этом наилучшие показатели продемонстрировали образцы, содержащие 20% модификатора.

Таким образом, установлено, что для обеспечения наилучших механических характеристик бетона необходимо введение в его состав ДП в количестве 20% от массы цемента (табл. 4).

Таблица 4. Механические свойства образцов бетонов, содержащих в своем составе ДПСО

Образцы бетона	Массовое содержание ДП	Мах предел прочности на сжатие, МПа	Мах нагрузка, кН	Модуль упругости, ГПа
Контрольный образец (№0)	0%	25,101	119,332	27,5
№1	10% ДП №1	30,756	144,245	42,71
№2	15% ДП №1	34,750	162,352	50,8
№3	20% ДП №1	40,112	222,722	51,70
№4	25% ДП №1	33,659	217,675	50,8
№5	30% ДП №1	28,665	114,765	50,04
№6	35% ДП №1	23,215	108,787	47,61
№7	50% ДП №1	21,741	94,158	46,41
№8	10% ДП №2	35,073	166,947	42,33
№9	15% ДП №2	39,708	186,229	43,175
№10	20% ДП №2	39,400	194,439	48,54
№11	25% ДП №2	32,531	153,465	45,05
№12	30% ДП №2	32,261	151,431	44,14
№13	35% ДП №2	29,40	125,242	43,32
№14	50% ДП №2	25,078	119,295	39,23
№15	10% ДП №3	27,947	121,040	45,10
№16	15% ДП №3	31,808	142,277	44,50
№17	20% ДП №3	36,615	174,178	47,84
№18	25% ДП №3	30,595	140,087	46,04
№19	30% ДП №3	27,078	130,730	45,02
№20	35% ДП №3	18,202	80,718	44,57
№21	50% ДП №3	17,225	80,124	39,74

Исследование микроструктуры и химического состава полученных образцов бетона

Методом сканирующей электронной микроскопии проведено исследование морфологии и микроструктуры образцов бетона, модифицированных ДП в количестве 20% от массы цемента. Результаты анализа представлены на рисунке 10. Микроанализ образцов бетона с добавлением ДП №1, ДП №2 и ДП №3 в количестве 20 % от массы цементной смеси показал, что модифицированные образцы характеризуются плотной структурой. При этом однородность состава увеличивается от третьего к первому образцу, что хорошо согласуется с результатами определения прочности на сжатие и модуля упругости бетонных образцов. Анализ микроструктуры контрольного образца выявил его неоднородную структуру, сопровождаемую такими концентраторами источником внутренних напряжений в бетоне, как крупные поры и капилляры.

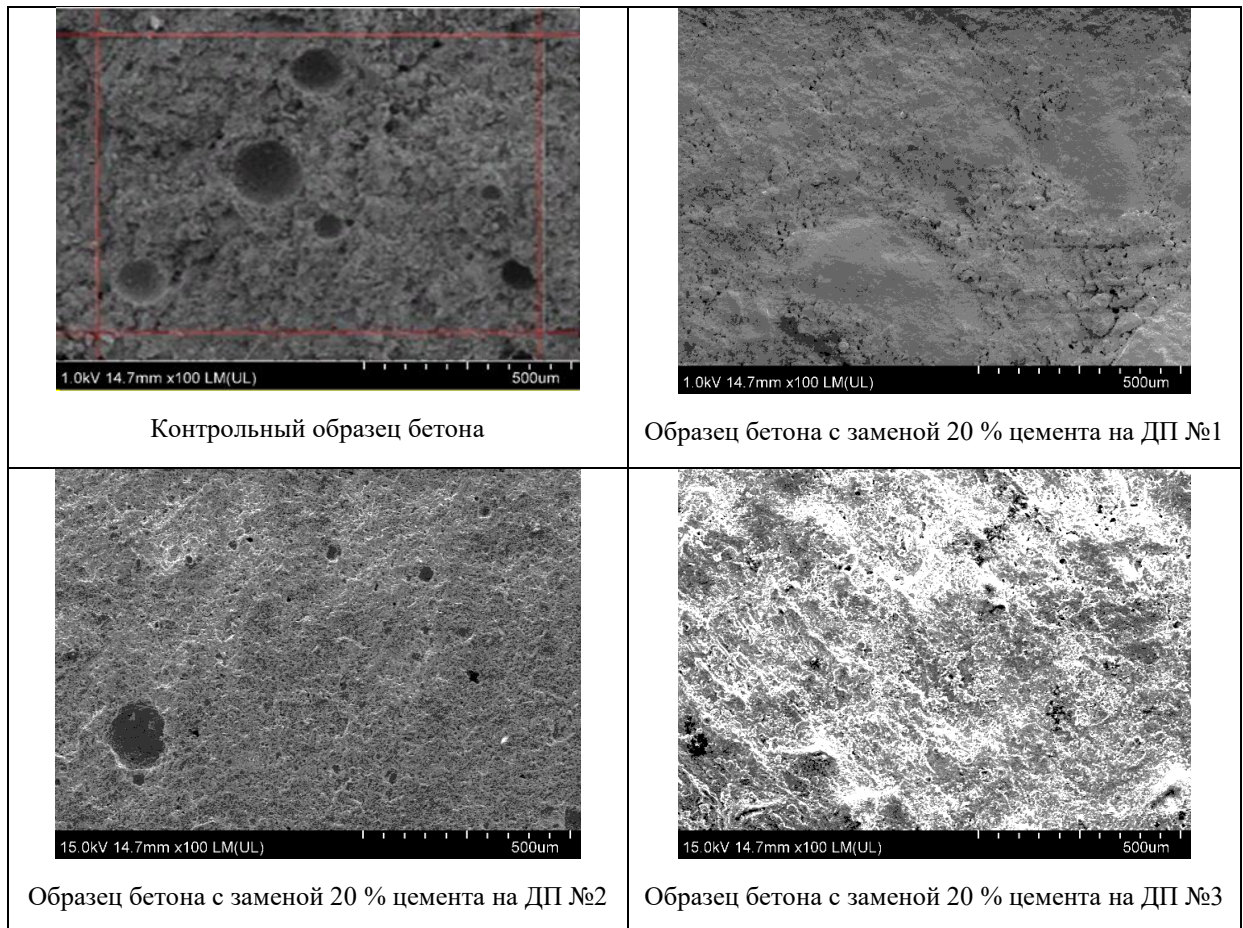


Рисунок 10. Анализ морфологии поверхности образцов бетона на сканирующем электронном микроскопе SU8010, Hitachi при увеличении (x100)

В рамках исследования был проведен рентгенофазовый анализ контрольных и модифицированных образцов бетона (рис. 11).

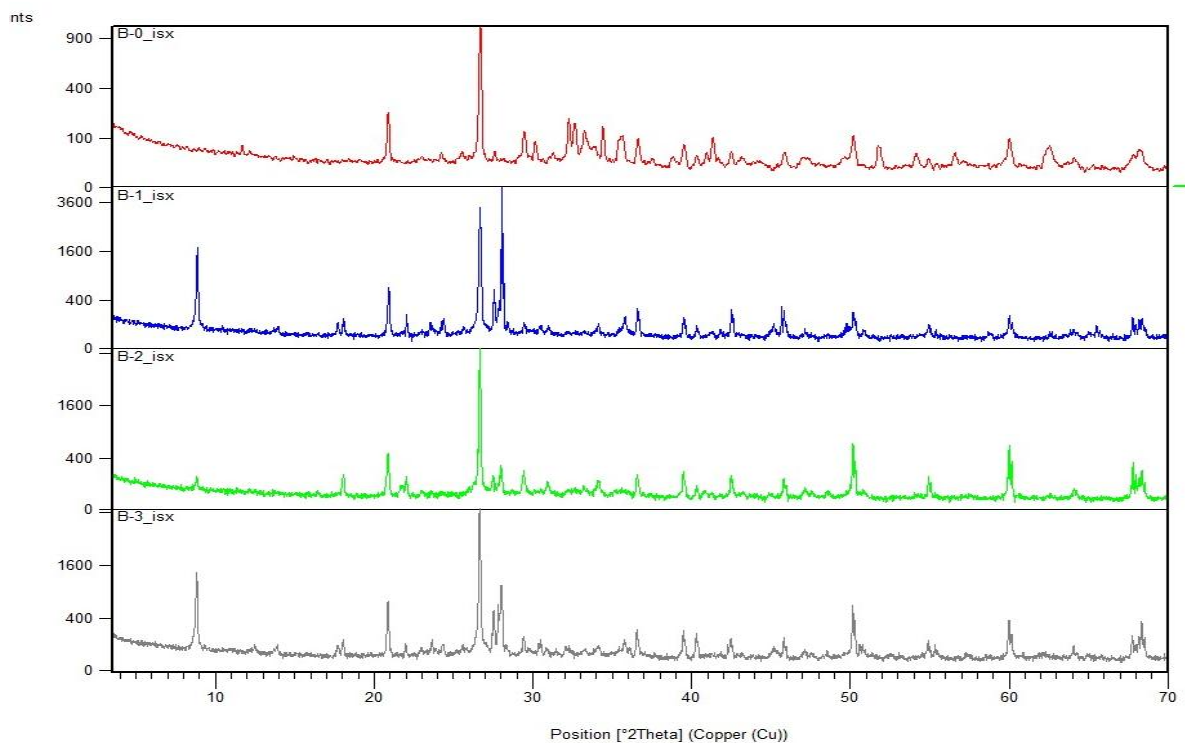


Рисунок 11. Результаты рентгенографического фазового анализа образцов бетона:

— - контрольный образец; — - образец 1; — - образец 2; — - образец 3

Результаты анализа показали, что в модифицированном бетоне наблюдается снижение содержания минералов $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$ и $\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$. Предполагается, что в результате гидролиза эти минералы образуют гидросиликаты типа C-S-H(I) , повышающие прочностные характеристики бетона. В модифицированных образцах также зафиксировано увеличение содержания аморфного кремнезема (SiO_2) и натрий-кальциевых алюмосиликатов, таких как $(\text{Na,Ca})\text{Al}[\text{Si}_3\text{O}_8]$, по сравнению с исходными образцами. Эти компоненты формируют плотные гелеобразные структуры, положительно влияющие на прочность бетона. Образование данных структурных элементов обусловлено наличием в составе ДПСО оксидов алюминия и кремния.

Результаты спектроскопического анализа (рис. 12) согласуются с данными рентгенофазового исследования. ИК-спектроскопическое исследование бетонных образцов выявило различия в спектральных характеристиках модифицированного бетона и контрольного образца.

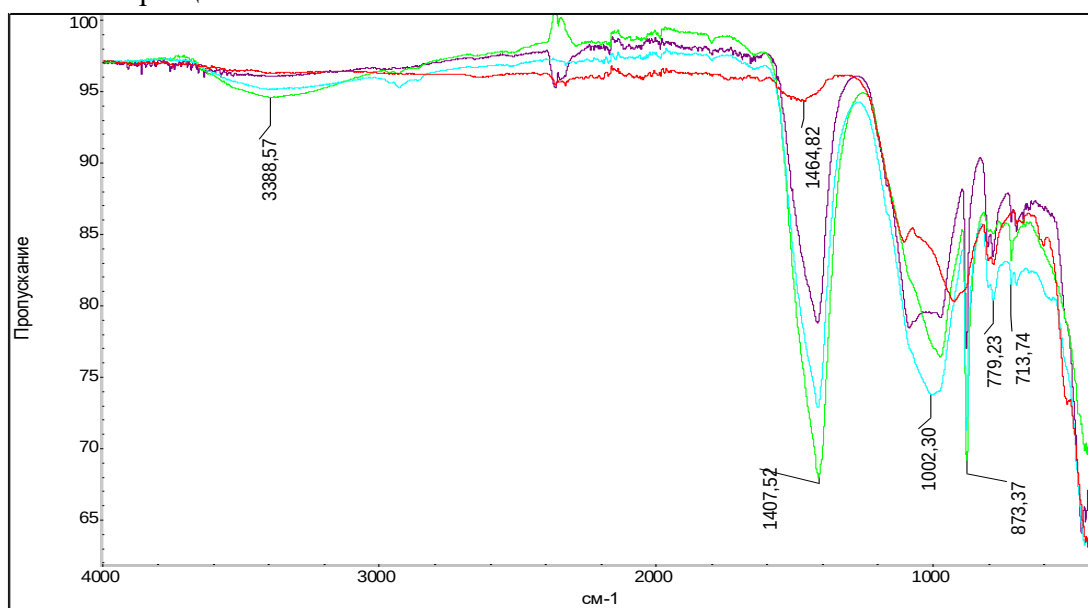


Рисунок 12. Результаты спектрального анализа образцов бетона:

— - контрольный образец; — - образец 1; — - образец 2; — - образец 3

В спектрах модифицированного бетона зарегистрированы полосы поглощения на частотах $\sim 990 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 450\text{--}470 \text{ см}^{-1}$, характерные для валентных ($\nu(\text{Si-O})$) и деформационных ($\delta(\text{O-Si-O})$) колебаний кремний-кислородных связей. Эти результаты указывают на формирование C-S-H геля в структуре модифицированного бетона.

Образование C-S-H геля сопровождается ростом микроскопических игольчатых и пластинчатых кристаллов, формирующих плотную матричную структуру, обеспечивающую надежное сцепление компонентов бетонной смеси, что способствует повышению прочности материала. Увеличение содержания C-S-H геля происходит в результате химической реакции между аморфными алюмосиликатами, содержащимися в составе кирпича, и гидроксидом кальция (Ca(OH)_2).

Таким образом, экспериментально установлено, что модифицирование бетона ДПС строительных отходов фракцией $-0,026+0 \text{ мм}$ в количестве 20 % от массы цемента обеспечивает рост модуля упругости на (%) 88,0, 76,5 и 73,96 (образцы ДП №1, ДП №2 и ДП №3, соответственно); прочности на сжатие – на (%) 59,8%; 58,1 и 45,96 (ДП №1, ДП №2 и ДП №3, соответственно) по сравнению с контрольным образцом. При этом максимальные показатели прочности на сжатие составили 40,1 МПа, модуля упругости – 51,7 ГПа.

В пятой главе представлены результаты численного моделирования элементов конструкции типового трёхэтажного здания школы, выполненного с использованием разработанных составов бетона. В качестве объектов исследования выбраны ключевые элементы конструкции: стандартное перекрытие и колонна. Моделирование железобетонных элементов и анализ их напряжённо-деформированного состояния под действием внешних нагрузок осуществлялись с применением программного комплекса ANSYS. Геометрия модели перекрытия и колонны создана с помощью программного модуля DesignModeler с использованием твердотельных элементов для бетонных конструкций и линейных элементов для арматуры.

Анализ результатов расчёта плиты перекрытия показал, что применение модифицированного бетона позволяет снизить толщину перекрытия с 200 до 160 мм при уменьшении диаметра арматуры с 20 до 16 мм с сохранением несущей способности конструкции. Также расчетным путем установлено, что при использовании модифицированных бетонов возможно уменьшение размеров поперечного сечения колонны с 350х350 мм до 300х300 мм при уменьшении диаметра арматурных стержней с 20 мм до 18 мм без снижения механических характеристик конструкции.

Расчет экономической эффективности использования модифицированного бетона

Проведён анализ экономической эффективности использования модифицированного бетона по сравнению с исходным материалом. Расчеты показали, что себестоимость модифицированного бетона составляет 7831 руб./м³, что на 7 % ниже стоимости традиционного бетона (8411 руб./м³).

Выполнен сравнительный расчет стоимости плиты перекрытия и колонны, изготовленных из модифицированных бетонных составов, при условии уменьшения толщины и плотности армирования конструкций (табл. 5).

Таблица 5. Расчет стоимости конструктивных элементов типового здания, изготовленных с использованием разработанных составов бетона, по сравнению с базовым вариантом

Варианты исполнения	Материал	Стоимость, руб.	Расход	Экономия стоимости материала, %
Базовый вариант	Плита перекрытия			
	Бетон	60 559	7,20 м ³	
	Арматура	135 886	1420,42 кг	
	Итого	196445		
	Колонна			
	Бетон	5 047	0,6 м ³	
	Арматура	4 200	60 кг	
	Итого	9247		
Вариант изготовления с применением модифицированного бетона	Плита перекрытия			
	Бетон	45 106	5,76 м ³	26
	Арматура	86 529	1150,85 кг	37
	Итого	131635		33
	Колонна			
	Бетон	3 445	0,44 м ³	32
	Арматура	3500	50 кг	17
	Итого	6945		24,5

Результаты расчета показали, что применение модифицированного бетона обеспечивает суммарный экономический эффект в размере 33% для плит перекрытия и 24,5 % для колонн за счет снижения толщины и процента армирования железобетонных конструкций, а также снижения затрат на производство бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически обоснована и практически доказана возможность получения бетонных композитов, модифицированных ДП и УДП строительных отходов. Изучено влияние ДП строительных отходов на механические характеристики бетонных композиций.

2. Методом механического измельчения получены ДП и УДП строительных отходов. Проведено исследование их химического и гранулометрического составов. Установлен размер фракции модифицирующей добавки (ДП) $-0,026 + 0$ мм, обеспечивающей их химическую и гранулометрическую стабильность независимо от условий измельчения.

3. Проведены систематические исследования процесса измельчения строительных отходов (кирпичный бой) с получением УДП и ДП. Установлены кинетические зависимости и значения констант этого процесса ($0,041 - 0,242 \text{ мин}^{-1}$).

4. Показано, что степень измельчения ДП зависит не только от состава исходного материала, но от регулируемых параметров процесса. Установлено, что по степени значимости технологические параметры получения ДП строительных отходов располагаются следующим образом: скорость измельчения, длительность помола, соотношение масс шаровой загрузки и измельчаемого материала. Предложена эмпирическая зависимость выхода фракции с размерами $-0,026+0$ мм от регулируемых параметров измельчения. Проведена оптимизация регулируемых параметров измельчения, обеспечивающих выход данной фракции в количестве 77-78% от загруженного материала.

5. Показано, что применение ДП строительных отходов фракцией $-0,026+0$ мм в качестве модификатора улучшает основные физико-механические свойства бетона. Установлено, что наилучшие механические показатели бетона обеспечивает добавка к цементу 20 % ДП, которая повышает прочность на сжатие бетонных образцов на 46-59,8 %, модуль упругости – на 74-88 %.

6. Разработаны составы бетонных смесей, модифицированных ДП фракцией $-0,026 + 0$ мм, проведены их испытания и качественная оценка.

7. Установлено, что модифицирование бетонной смеси ДП строительных отходов приводит к увеличению содержания С-S-Н геля, аморфного кремнезема и алюмосиликатов в структуре бетона, что способствует повышению его прочностных свойств.

8. Расчётно-экспериментальным путём доказано, что применение бетонов с модифицирующей добавкой из ДПСО позволяет уменьшить степень армирования железобетонных конструкций по сравнению со стандартным проектом. Экономический эффект от замены бетона класса В22,5 на бетон, модифицированный ДПСО, составит 33% для плит перекрытия и 25 % для колонн.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях RSCI

1. Горшков А.С. Влияние ультрадисперсных добавок на механические свойства бетона/ М.Ю. Малькова, А.С. Горшков, А.Н. Задиранов, Е.А. Ларионов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений – 2025 Т.21 №1- С. 62-70
2. Горшков А.С. Гидрометаллургическая переработка кабельного лома и ее оптимизация. / А.Н. Задиранов, А.В. Мещеряков, М.Ю. Малькова, Т.Н. Нурмагомедов, Т.Г., Грушева, А.С. Горшков //Металлург. – 2023 - №5 – С. 108-114

Публикации в изданиях, входящих в Перечень РУДН/ВАК РФ

3. Горшков А.С. Перспективы измельчения строительных отходов в целях получения минерального порошка для увеличения прочности бетона // Инновации и инвестиции - 2024. №2 – С.554-557
4. Горшков А.С. Исследование прочности бетона, полученного методом замещения цемента нанопорошком из остатков строительного производства / А.С. Горшков, Е.С. Горшкова // Инновации и инвестиции - 2024. №3 – С.465-469
5. Горшков А.С. Расчет железобетонных конструкций, изготовленных из бетонов, модифицированных дисперсными порошками / А.С. Горшков, Е.С. Горшкова // Экономика строительства – 2025 - №7 - С 702-705

Публикации в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science

6. Gorshkov A.S. Hidrometallurgical processing of cable scrap and its optimization / A.N. Zadiranov, A.V. Meshchervakov, M. Y. Malkova, T.N. Nurmagomedov, T.G. Grusheva, A.S. Gorshkov / Metallurgist -2023-t.67 - №5-6 – С.703-713.
7. Malkova M. Y. Study of ore sulfatizaion process of the TOMTOR mining deposit /, M. Y. Malkova, A.N. Zadiranov, O.G. Zubova, A.S. Gorshkov, Dkhar P. // Сборник AIP Conference Proceedings. Proceedings of the international conference on engineering research - 2021 (ICER 2021)- Moscow, 2022.- С. 020006.
8. Gorshkov A.S. Improving the quality of titanium alloy parts used in the space industry / A. Asoyan, A.S. Gorshkov, I. Danilov, A. Marusin // Advances in the Astronautical Sciences, 2021, 174, p 621–629

АННОТАЦИЯ**Горшков Александр Сергеевич****«Бетоны, модифицирование дисперсными порошками строительных отходов»**

Диссертация посвящена разработке составов и исследованию механических характеристик бетонов, модифицированных ультрадисперсными порошками, полученными из строительных отходов методом механической дезинтеграции. В работе выявлены закономерности формирования дисперсных и ультрадисперсных порошков, полученных из отходов строительной промышленности, с целью их использования в качестве модифицирующих компонентов бетонной смеси. Определены оптимальные технологические параметры, обеспечивающие получение дисперсных порошков заданной фракции. Разработаны новые рецептуры бетонных смесей, содержащих дисперсные порошки строительных отходов в количестве 20% от массы цемента. Прочность на сжатие модифицированных бетонных образцов превосходит контрольные значения на 46-60%, модуль упругости – на 74-88 %. Разработанные составы бетонов обеспечивают снижение массы плиты перекрытия на 23 %, массы арматуры – на 36% по сравнению со стандартным исполнением. Экономический эффект от замены бетона класса В22,5 на бетон, модифицированный дисперсными порошками строительных отходов, составит 33% для плит перекрытия и 25 % для колонн.

ABSTRACT**Gorshkov, Alexander Sergeevich****«Concretes, modification with dispersed powders of construction waste»**

The study focuses on the development of compositions and the study of the mechanical characteristics of concrete modified with ultrafine powders obtained from construction waste by mechanical disintegration. The study identifies the formation patterns of dispersed and ultrafine powders obtained from construction waste for use as modifying components of concrete mixes. Optimal process parameters for producing the desired group of dispersed powders have been determined. New concrete mix formulations containing dispersed powders from construction waste at a rate of 20% of the cement mass have been developed. The compressive strength of the modified concrete samples exceeds the reference values by 46-60%, and the modulus of elasticity by 74-88%. The developed concrete compositions ensure a 23% reduction in the mass of the floor slab and a 36% reduction in the mass of the reinforcement compared to the standard version. The economic effect of replacing class B22.5 concrete with concrete modified with dispersed powders of construction waste will be 33% for floor slabs and 25% for columns.