

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»

На правах рукописи

Горшков Александр Сергеевич

**БЕТОНЫ, МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ
СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, доцент
Малькова Марианна Юрьевна

Москва – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	4
1.	Глава 1. 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ)	10
1.1	Виды бетонов, их классификация	10
1.2	Бетоны с повышенными механическими свойствами	13
1.3	Основные группы наполнителей бетонов	16
1.3.1	Наномодификаторы бетонов	17
1.3.2	Модификаторы бетонов промышленного типа	19
1.3.3	Армирующие волокна	25
1.4	Рециклинг строительных отходов и их экологическое воздействие на окружающую среду	29
1.5	Выводы по главе и обоснование направлений экспериментальных исследований	30
2	Глава 2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ	33
2.1	Характеристики применяемых материалов.	33
2.2	Методика и оборудование для получения порошков	34
2.3	Изучение гранулометрических характеристик материалов	37
2.4	Изучение структурного и химического содержания дисперсных и ультрадисперсных порошков	38
2.5	Получение образцов бетона, модифицированного дисперсными порошками строительных отходов	41
2.6	Методика испытаний прочности образцов бетона на сжатие	43
2.7	Методика оценки модуля упругости образцов бетона	45
2.8	Методика анализа морфологии поверхности, химического состава и микроструктуры образцов бетона	46
2.9	Обработка экспериментальных данных	49
2.10	Выводы по главе	50
3	Глава 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ	51
3.1	Характеристика и классификация порошковых материалов	51
3.2	Получение дисперсных порошков	51
3.3	Исследование гранулометрического и химического составов дисперсных порошков	54
3.4	Исследование кинетики измельчения дисперсных порошков	69
3.5	Получение порошков ультрадисперсной фракции	73
3.6	Обработка результатов экспериментов	77

3.7	Оптимизация технологических параметров измельчени	83
3.8	Выводы по главе	85
4	ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО ДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ	87
4.1	Результаты испытаний образцов бетона на прочность	87
4.2	Определение модуля упругости образцов бетона	96
4.3	Анализ микроструктуры и химического состава полученных образцов бетона	100
4.4	Статистическая обработка экспериментальных данных	107
4.5	Выводы по главе.	111
5	ГЛАВА 5. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПОВОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДП СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ	113
5.1	Описание математической модели для численного расчета	114
5.2	Расчет несущей способности плиты перекрытия, выполненной с использованием разработанных составов бетона	121
5.2.1	Анализ несущей способности железобетонной плиты перекрытия при использовании арматуры диаметром 16 мм и 18 мм	126
5.3	Расчет несущей способности колонны, изготовленной с применением модифицированного бетона	130
5.4	Расчет экономической эффективности использования разработанных составов бетонов	135
5.5	Выводы по главе.	137
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	139
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	141

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы.

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 разработка составов и 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 (бой кирпичей) 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 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 бетонных смесей.

Методы исследований: 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.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения ДП, полученных измельчением строительных отходов, в качестве модифицирующей добавки в технологиях изготовления бетонов с повышенными эксплуатационными 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 и ультрадисперсной фракции. 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 %, упругости – на 55,3-88,0 % по сравнению с бетонами, изготовленными по традиционной технологии.

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

4. Показано, что применение бетонных смесей 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.

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 результатов работы. Материалы и основные результаты работы обсуждались 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, подготовке программы экспериментальных испытаний, проведении экспериментов и получении результатов исследования, обработке и анализе данных проведенных численных расчетов и экспериментальных исследований, оформлении материалов публикаций.

Публикации.

Материалы диссертации изложены в 8 научных публикациях. Из них: 3 статьи опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых международными базами данных Scopus и Web of Science; 3 публикации – в рецензируемых научных изданиях, включенных в Перечень ВАК.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего 357 наименований. Работа изложена на 188 листах машинописного текста, содержит 60 рисунков, 36 таблиц.

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ИСТОЧНИКОВ (ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ)

1.1. Виды бетонов, их классификация

Бетон представляет собой универсальный материал, который широко используется в различных областях строительства. Он занимает второе место по объёму потребления в мире, с ежегодным производством, превышающим 2,6 миллиарда тонн [1]. В условиях современного строительства, характеризующегося высотными и нагруженными конструкциями, требуются материалы с повышенными эксплуатационными характеристиками, такими как высокая прочность и длительный проектный срок службы. При этом требования к механическим свойствам бетонов постоянно возрастают [2-4].

На сегодняшний день существует более тысячи разновидностей бетона, которые различаются по составу, назначению, эксплуатационным свойствам и технологическим характеристикам. Современная классификация бетонов [5-6] основывается на их назначении, плотности, структуре, типах вяжущего вещества и заполнителя (Рисунок 1.1).

По основному назначению бетоны подразделяются на конструкционные и специальные. Конструкционные бетоны представляют собой материалы общего назначения, которые применяются в гражданском и промышленном строительстве. Специальные бетоны обладают повышенными эксплуатационными характеристиками и используются в условиях, требующих особых свойств материала, таких как высокая прочность, устойчивость к агрессивным средам, морозостойкость и другие.

В зависимости от типа вяжущего компонента, бетоны классифицируются на следующие виды [6]:

- цементные бетоны, изготавливаемые на основе цемента, включая портландцементный и глиноземистый клинкер;
- известковые бетоны, производимые с использованием известковых вяжущих путем воздушного или автоклавного твердения;

- шлаковые бетоны, включающие шлакощелочные вяжущие, шлаки или золы, активированные при помощи гипса, извести или цемента;
- гипсовые бетоны, основу которых составляет полуводный строительный гипс;
- специальные бетоны, обладающие особыми эксплуатационными характеристиками и производимые с применением органических и неорганических вяжущих компонентов.

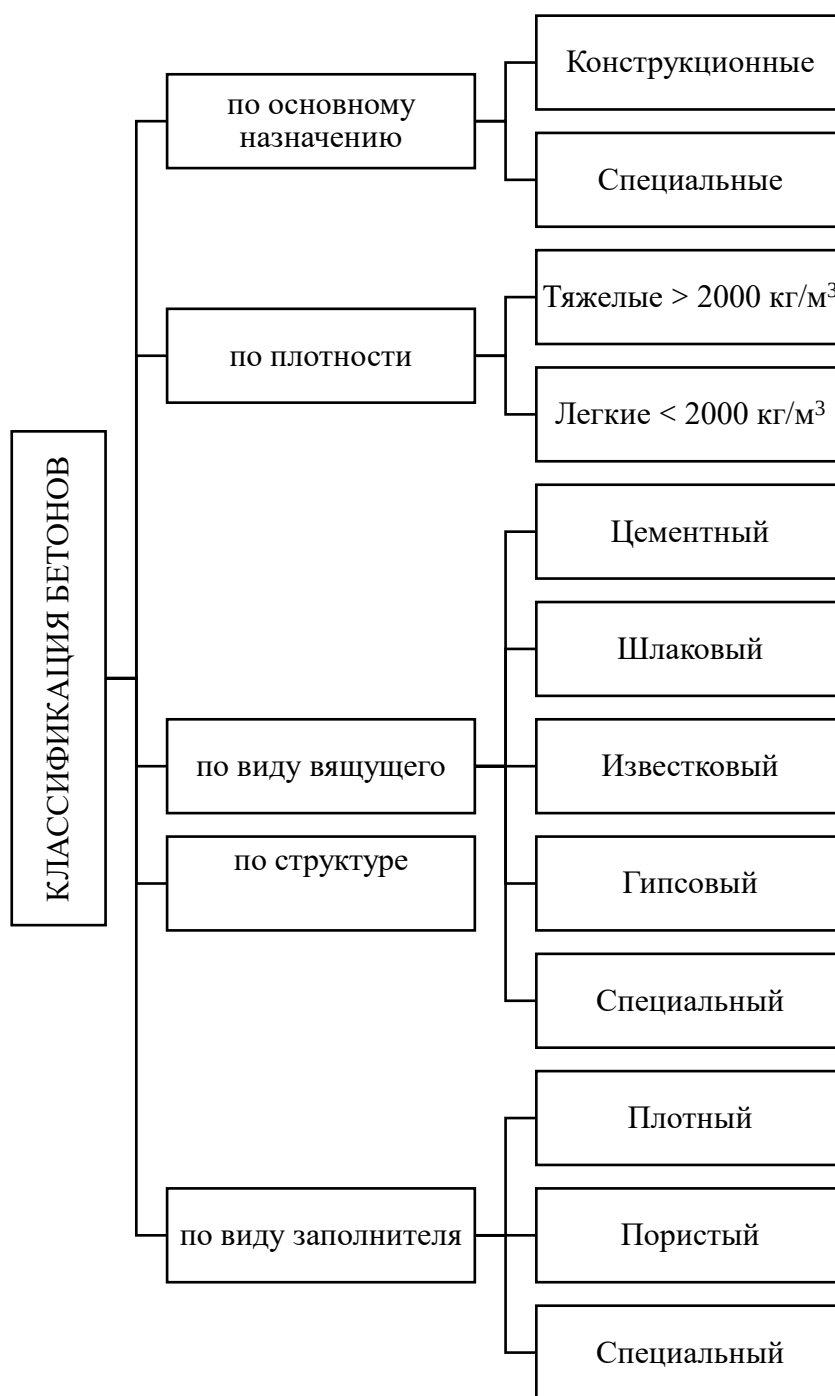


Рисунок 1.1– Классификация бетонов

Классификация бетонов по характеру внутренней структуры осуществляется на основе содержания воды, а также особенностей распределения заполнителей и вяжущего компонента. В зависимости от этих параметров выделяют несколько типов бетонов [7] (рисунок 1.2):

- Бетоны плотной структуры – характеризуются водосодержанием менее 7 % от общего объема. В таких бетонах пространство между зернами заполнителей полностью заполнено цементным камнем.
- Бетоны поризованной структуры – отличаются водосодержанием свыше 7 % от общего объема. Помимо заполнения пространства между зернами заполнителей цементным камнем, в их состав входят пено- и газообразующие компоненты.
- Бетоны ячеистой структуры – состоят из затвердевшей смеси вяжущего компонента и искусственных равномерно распределённых пор с формой в виде ячеек, сформированных газо- или пенообразователями.
- Бетоны крупнопористой структуры – характеризуются формированием пространства между зернами крупного заполнителя, заполнение которого мелким заполнителем и цементным камнем осуществляется не полностью.

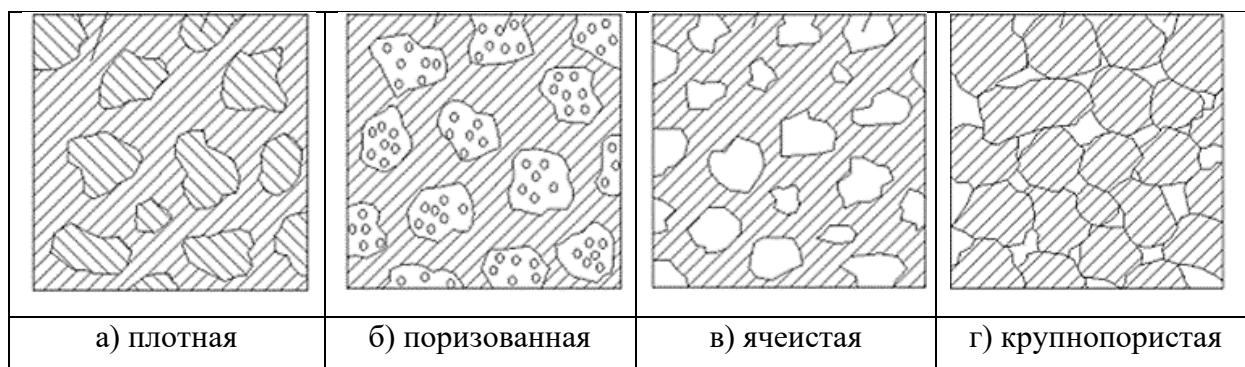


Рисунок 1.2 – Типы бетонов по внутренней структуре

Бетонные смеси на основе различных видов цемента широко применяются в гражданском и промышленном строительстве. При этом установлено [8-31], что их использование и подготовка могут быть сопряжены с определенными экологическими проблемами. Так, обжиг клинкера, входящий в технологический цикл производства портландцемента и

проводимый при температуре $\sim 1450^{\circ}\text{C}$ [8], приводит к загрязнению атмосферы воздуха углекислым газом в количестве 0,35 кг/кг готового продукта. При этом показано [9], что осуществление операции обжига требует $\sim 0,95$ МДж электроэнергии. В целом производство портландцемента в [10-11; 12-31] связывают с долей выброса в атмосферу воздуха до 5 % образующегося на планете углекислого газа.

В этой связи применение оборотных строительных отходов при производстве высокоэффективных добавок к бетону может служить одним из методов борьбы с загрязнением атмосферы углекислым газом.

Однако прежде представляет интерес рассмотрение способов повышения механических характеристик бетона.

1.2. Бетоны с повышенными механическими свойствами

Высокопрочный бетон (High performance concrete – HPC) является строительным материалом, который широко применяется в последние десятилетия благодаря своим высоким эксплуатационным характеристикам [4; 32; 33]. Так, прочность HPC бетона на сжатие может достигать 200 МПа [13]. Согласно [34], в Российской Федерации к высокопрочным относятся бетоны класса прочности на сжатие B55 и выше. В соответствии с Европейским стандартом EN206-1 высокопрочным считается бетон с характеристикой прочности C50/60 и выше, что соответствует марке бетона B60 [34].

Высокопрочный бетон находит широкое применение в производстве железобетонных конструкций различного назначения. При этом он особенно востребован при возведении высотных зданий. Замена традиционного бетона на высокопрочный позволяет снизить количество арматурных стержней, что приводит к уменьшению веса конструкций и увеличению срока их службы [35; 36]. Особенно эффективно высокопрочные бетоны проявляют себя в конструкциях, противостоящих сжимающим усилиям [37]

Так, их применение для изготовления напряженных изгибаемых конструкций с облегченными сечениями [32] и тонкостенных конструкций с большими перерезывающими усилиями позволяет уменьшить степень поперечного армирования и толщину конструкций, что способствует снижению их массы и металлоемкости [36 - 39].

При этом себестоимость высокопрочного бетона значительно превышает стоимость бетонов традиционных классов В20-В40. Так, например, разница в стоимости высокопрочного бетона класса ВПБ60 и бетона класса В20 составляет 37,5% [35].

Следует отметить рост интереса к бетонам со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками (Ultra-High Performance Concrete, УНРС). Согласно установленным характеристикам, эти материалы обладают выдающимися прочностными свойствами, долговечностью не только в традиционных условиях эксплуатации, но и в агрессивных средах, содержащих металло-сульфаты и хлориды, а также другие химически активные вещества. Достаточно отметить, что при этом прочность УНРС превышает 100 МПа, что значительно превосходит аналогичные показатели традиционных бетонов [40; 41]

За последние три десятилетия бетон со сверхвысокими эксплуатационными характеристиками (УНРС) утвердился в качестве одного из наиболее перспективных, высокотехнологичных и экономически благоприятных к промышленному использованию строительных растворов такого типа [42-45].

При этом известно [46], что подобные виды бетонов широко используются для изготовления высоконагруженных элементов строительных конструкций, в частности, для таких объектов, как соединительные балки высотных зданий, сборные, взрывостойкие и специальные конструкции (например, контейнеры для хранения ядерных отходов).

Согласно данным [47;48], основными компонентами УНРС являются высокомарочный цемент, мелкозернистый песок фракцией -600+150 мкм, а

также дробленый кварц. При этом отличительной особенностью УНРС является низкое водоцементное соотношение, что обеспечивает высокую плотность и прочность при одновременно незначительной обрабатываемости.

Следует отметить, что при разработке бетонов особое внимание уделяется не только их прочностным характеристикам, но и технологичности, долговечности и другим эксплуатационным свойствам. Согласно [49], для строительного бетона выделяют три его характеристики, которые считают ключевыми. Речь идет об обрабатываемости, прочности и долговечности композиции.

При этом известно [50], что традиционные бетонные смеси, как правило, содержат большую долю цемента (350–400 кг/м³ бетона) в противовес низкой доле мелких (инертных) составляющих бетон частиц. Варьируя минералогический состав цемента, можно добиваться изменения его эксплуатационных свойств.

Однако следует помнить, что важнейшей задачей всегда считалось максимально возможное снижение доли цемента в бетоне, либо альтернативная замена его различными наполнителями, которые вводятся на этапе приготовления смеси вместе со всеми связующими элементами раствора. Это обеспечивает достижение такой плотности упаковки частиц, при которой полученная смесь будет представлять собой плотную гранулированную структуру, которая позволит понижать расход различных связующих, одновременно улучшая механические характеристики бетона.

Многие исследователи отмечают, что использование дисперсных частиц для модифицирования бетонной смеси значительно повышает её механические свойства. Это связано с высокой реакционной активностью дисперсных частиц, обусловленной значительной удельной площадью их поверхности [51–55]

В этой связи представляло интерес подробное рассмотрение данного вопроса.

1.3. Основные группы наполнителей бетонов

В соответствии с классификацией, предложенной [56], наполнители для бетона подразделяются на 4 группы в зависимости от их реакционной способности.

При этом к первой группе относят самостоятельно твердеющие дисперсные наполнители (СТДН), содержащие материалы с длительным периодом формирования структуры. Как правило, такие материалы обладают высокой реакционной поверхностью и способны вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента. К таким материалам относят: золы, шлаки, золошлаковые отходы тепловых электростанций (ТЭЦ), а также самостоятельно твердеющие наполнители.

Вторую группу представляют дисперсные наполнители, способные вступать в химическое взаимодействие с продуктами гидратации цемента (ХВДН). К этой группе относятся материалы, которые активно взаимодействуют с продуктами гидратации цемента, способствуя формированию более плотной и прочной структуры бетона. Примерами таких наполнителей могут служить: кремнезем, сильноокислые золы и шлаки, а также кварцевые пески фракцией тонкого помола.

В третью группу входят низкореакционно активные наполнители (НРАН). Эта группа включает материалы с низкой реакционной активностью, обусловленной их низкой удельной поверхностью ($400\text{--}500\text{ м}^2/\text{кг}$ цемента). Характерными представителями этой группы являются магнезиты, бокситы, сиениты, андезиты, аргиллиты, диабазы, габбро и некоторые виды гранитов.

Четвертую группу бетонных добавок представляют реакционно неактивные наполнители (РНН). Речь идет о группе, которая объединяет материалы с низкой химической активностью, основная задача которых состоит в том, чтобы выполнять роль центров кристаллизации в процессе формирования структуры цементного камня. При этом РНН химически индифферентны к продуктам гидратации цемента, сохраняя тем самым

эксплуатационные свойства бетона. К этой группе относят оксиды некоторых металлов (алюминия, титана, цинка), кроме них – сажу и пиролюзиты.

При этом для улучшения эксплуатационных характеристик бетонов в их состав вводят модификаторы минерального, химического или волокнистого типов [14; 42; 57-85].

Первые из них представляют тонкодисперсные порошки, предназначенные для улучшения плотности и прочности бетона. Вторые (в частности, суперпластификаторы, ускорители твердения, ингибиторы коррозии и др.) позволяют регулировать реологические свойства бетонной смеси и ускорять процесс твердения, защищая бетон от агрессивного окислительного воздействия окружающей среды. Волокнистые материалы, такие как фибры и микроволокна, повышают прочность и трещиностойкость бетона, улучшая его сопротивление ударным и усталостным нагрузкам.

В этой связи нельзя не вспомнить о влиянии крупности модифицирующих добавок на свойства бетонов. Представляет интерес рассмотреть ключевые моменты этого вопроса.

1.3.1 Наномодификаторы бетонов

Известно, что для модифицирования бетонов используют порошки различной крупности: от самых мелких (наноразмеров) до порошков, гранулометрический состав которых по крупности отвечает микронному и миллиметровому диапазону (рисунок 1.3). Рассмотрим примеры этих модификаторов и их действие более подробно.

Бетоны, содержащие наноразмерные компоненты, отражают перспективное направление в современной строительной индустрии. Наномодифицированным считают бетон, содержащий наноразмерные объекты, линейный размер которых не превышает 100 нм. При этом экспериментально установлено, что модификаторы в виде нанодобавок значительно расширяют возможности для улучшения функциональных свойств бетона и существенно снижают давление на экологию в процессе его эксплуатации.

Присутствие наноразмерных добавок в бетонной композиции способствует целенаправленному (заданному) изменению микроструктуры и эксплуатационных свойств [13; 15; 86-103]: в частности, установлено [103], что включение в состав бетонной смеси нанопорошков-модификаторов повышает прочность бетона не менее чем в 1,5 раза, делая его более устойчивым к механическим нагрузкам.

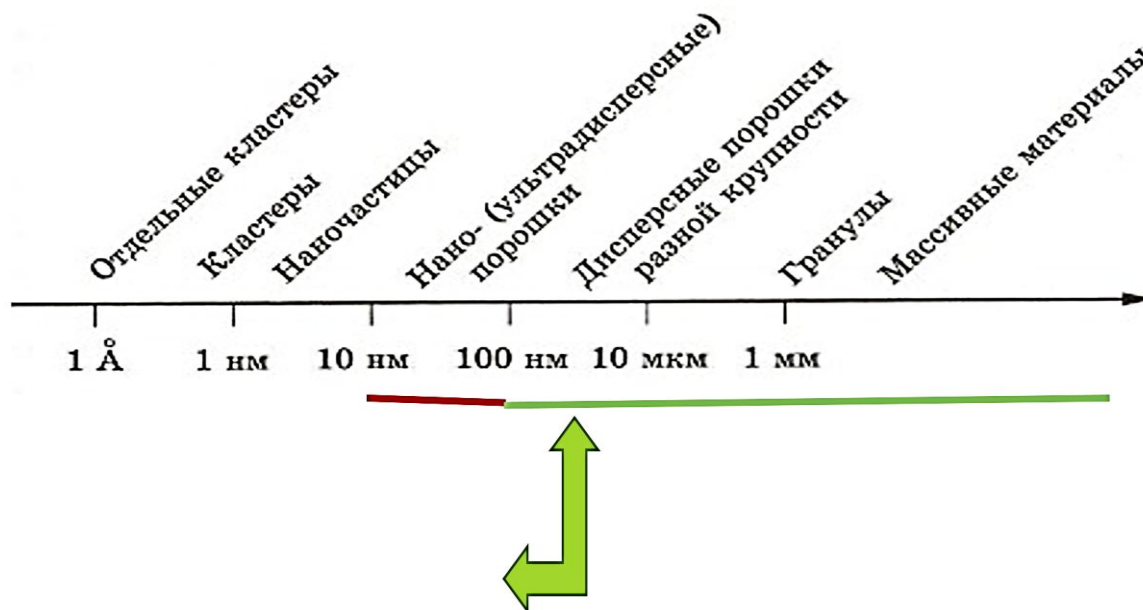


Рисунок 1.3 – Шкала дисперсности твердых материалов

К промышленному выпуску предлагаются такие наночастицы, как нано- SiO_2 и нано-оксиды металлов (Ti, Fe, Al), углеродные нанотрубки/волокна. Эти материалы позволяют создавать бетоны с уникальными эксплуатационными характеристиками, открывая новые технологические горизонты строительной индустрии.

В [104] провели исследование влияния нанодобавок, таких, как нанодвуокись титана, наноглинозем, нанометакаолин, наноглина, наноцеллюлоза и углеродные нанотрубки, на свойства бетона. При этом экспериментально установлена оптимальная концентрация нанометакаолина в составе бетона (10 % от массы цемента). Полученный по такой рецептуре бетон характеризовался повышенной прочностью: более, чем в 1,6 раза – на сжатие и в 1,5 раза – на изгиб. Наличие наноглинозема в бетоне в

концентрации 1-3 % повышает его прочность при сжатии на 46 %, при изгибе — на 16,7% [104; 113-115].

При этом констатируется, что в настоящее время одной из самых популярных и эффективных минеральных добавок к бетону, обладающей высокими эксплуатационными характеристиками, является нанокремнезем (НК) [1; 44-47; 99-100; 104-107].

Введение нанокремнезема в бетон способствует снижению его водопоглощения [46; 48] повышению устойчивости к агрессивным средам [110], электроизоляционных свойств [111-112]; плотности [44-47; 118-119], прочности на сжатие [44; 48; 51-53; 124-131], растяжение и изгиб [51; 54; 55].

Однако наночастицы представляют собой материал нестабильного характера по крупности, способный коагулироваться в течение нескольких недель после производства [132]. Данный факт подтверждают исследования [133-145].

В этой связи использование нанопорошков в действующем промышленном производстве или в массовом строительстве представляется проблематичным.

Поэтому в качестве модификатора бетонов чаще используют материалы большей крупности и гранулометрической стабильности. Как правило, речь идет об отходах минерального (руды, органо-минеральные вещества) и промышленного (строительные, металлургические, энергетические) типов и их рециклинге.

1.3.2 Модификаторы бетонов промышленного типа

Модифицирующие добавки для бетона представляют собой химические продукты неорганического или органического происхождения, которые вводятся в состав цементных смесей для улучшения их физико-химических характеристик и придания бетону необходимых эксплуатационных свойств. Эти добавки могут быть реакционноспособными, изменяющими химический состав бетона, либо инертными, улучшающими его структуру.

В зависимости от установленного целевого эффекта, модифицирующие добавки разделяют на три основные группы [146; 147]:

1. улучшающие характеристики готовых к применению бетонных смесей;
2. регулирующие эксплуатационные свойства бетонов;
3. придающие бетонам специальные свойства (химические лигатуры).

Анализ литературных источников выявил широкий спектр различных технологических подходов к производству модифицирующих добавок. Показано, что в качестве сырья для их изготовления могут использоваться, как природные, так и техногенные материалы и продукты [47; 48]. Примером таких модификаторов могут служить зола-унос, микрокремнезем, шлаки и другие порошковые отходы промышленности [47-48; 115-117; 121-123; 125].

В последнее время использование цемента, как основного ингредиента бетона, подвергается серьезной критике. Основной ее причиной считают выделение углекислого газа [176; 177]. В результате выработалось направление поиска добавок, способных укрепить бетон, сделав его одновременно экологичным, легким по весу и долговечным.

Утилизация техногенных отходов является актуальной экологической и экономической задачей. Техногенные отходы представляют собой побочные продукты промышленного производства, образующиеся в процессе переработки сырья с получением конечной продукции. К техногенным отходам относятся остатки сырья, материалов и полуфабрикатов, утратившие свои потребительские свойства в результате производственной деятельности [178].

Анализ статистических данных показывает, что в Российской Федерации ежегодно генерируется около 36 миллионов тонн пылевидных и газообразных отходов, 45 кубических километров сточных вод и до 10 миллиардов тонн твердых отходов [179]. По данным Росприроднадзора, вторичное использование или обезвреживание техногенных отходов составляет лишь 10–20%. При этом объем накопленных и ежегодно

образующихся отходов значительно превышает производственные мощности предприятий [180].

Накопление техногенных отходов негативно влияет на окружающую среду и является результатом неэффективного использования невозобновляемых природных ресурсов. Переработка этих отходов позволит снизить экологическую нагрузку и стать важным источником сырья для строительной промышленности. Одним из перспективных направлений их использования является производство строительных материалов [181]. Этот подход позволяет не только сократить объемы отходов, но и получить высококачественную продукцию, что делает его экономически целесообразным и экологически значимым.

Основные категории промышленных отходов включают золы и шлаки тепловых электростанций, отходы добычи и обогащения полезных ископаемых, металлургические шлаки, строительные материалы [182].

Доменные шлаки, образующиеся в процессе выплавки чугуна из железных руд, являются наиболее важным побочным продуктом черной металлургии и занимают первое место по объему среди металлургических отходов. Эти материалы находят широкое применение в строительной отрасли [194 -195].

Золошлаковые отходы тепловых электростанций (ТЭС) преимущественно используются в цементной промышленности. Они применяются в качестве медленноотвердеющего вяжущего материала для дорожного строительства, а также как активная гидравлическая добавка в сочетании с неорганическими, битумными или полимерно-битумными связующими. Кроме того, эти отходы могут служить наполнителем или малоактивной добавкой, заменяя часть цемента [196].

Применение золошлаковых отходов в производстве силикатного кирпича позволяет существенно сократить использование извести (экономия достигает 10–50% в зависимости от состава) и песка (примерно 30%).

Кирпичи, изготовленные с использованием этих отходов, имеют меньший вес по сравнению с традиционными кирпичами (в среднем на 10%).

В этой связи установлено, что такие материалы, как отходы тепловых электростанций (зола), металлургические отходы (пыли и шлаки) являются одними из наиболее массовых видов вторичного сырья [197]. Кроме того, установлено [176], что микрочастицы этих материалов повышают компактность, прочность и долговечность бетона. В работе [184] доказана техническая возможность и экономическая целесообразность использования летучей золы в качестве добавки к цементу. При этом указывается на возможность повышения ее активности за счет операции механоактивации. В [117] приведены результаты исследования прочностных характеристик самоуплотняющегося бетона с порошками-добавками из летучей золы. Установлено, что такой бетон характеризуется более низкой прочностью на сжатие, при этом наблюдается улучшение устойчивости к проникновению хлорид-ионов, снижение глубины проницаемости и водопоглощения.

Однако одним из наиболее часто используемых модификаторов в строительной индустрии является микрокремнезем, представляющий собой побочный продукт металлургического производства. Высокая пуццолановая активность микрокремнезема обусловлена развитой удельной поверхностью его частиц ($\sim 20000 \text{ м}^2/\text{кг}$). При этом диаметр большинства частиц составляет менее 1 мкм при среднем диаметре около 0,1 мкм, что приблизительно в 100 раз меньше среднего диаметра цементных зерен. В [68] показано, что оптимальное содержание модифицирующих добавок микрокремнезема в составе портландцемента, необходимое для достижения наилучших прочностных характеристик бетона, составляет 20 %.

Пары кремнезема с золой от рисовой шелухи (RHA) и переработанными керамическими отходами привлекли внимание исследователей из-за их положительного влияния на свойства бетона. RHA является побочным продуктом при производстве риса, и ее можно эффективно использовать, заменив ею 10-15 % цемента. В [185;186] показано улучшение прочностных

свойств бетона с добавлением в него RHA и переработанных керамических отходов.

В работе [191] представлены составы высококачественных малоцементных бетонов на основе органоминеральных модификаторов, с оценкой влияния соотношений добавок микрокремнезем/зола-уноса суперпластификатора и соотношения микрокремнезем/зола-уноса на прочность бетона.

В [192] в качестве перспективного направления в производстве бетонов предложена идея замены обычного портландцемента на композиционные вяжущие. Было установлено положительное влияние применения эффузивных пород (цеолиты, вулканические шлаки, перлиты и др.) в качестве вяжущих компонентов бетонов на их экономические, экологические и физико-механические характеристики.

В [67-76] показано, что металлургические шлаки обладают цементирующими или пуццолановыми свойствами, которые побуждают исследователей использовать их в производстве цемента или бетона. Другими авторами [193] изучены возможности применения гранулированных доменных шлаков в качестве тонкомолотой активной минеральной порошковой добавки к бетону. Так, экспериментально подтверждено, что по сравнению с контрольным образцом прочность на сжатие и изгиб бетона, содержащего 2-14 % нанометакаолина и 50 % Fe-Cr шлака через 14 и 28 дней увеличилась на 44,2-87,4 % и 73-135,8 %, соответственно. Авторы работы [63] добавляли в бетонную смесь природные кварцевые заполнители с максимальным размером 16 мм и доменный шлак в количестве 68 % от общей массы. При этом в роли вспомогательных материалов для цемента выступали: обычная летучая зола, мелкодисперсная летучая зола и кварцевая пыль. В качестве корректирующего наполнителя использовали кварцевый песок и кварцевую пудру для получения смеси с идеальной градуировкой. Полученный в результате бетон показал очень низкую глубину проникновения воды. При соотношении веса к плотности, равном 0,42, она составила от 8 до

14 мм, а при снижении этого соотношения до 0,27 – уменьшилась до 3-8 мм. При этом прочность бетона на сжатие превысила 80 МПа, а модуль упругости составил ~45 ГПа.

Авторы работы [59] изучали свойства бетона, изготовленного на основе портландцемента, состоящего из 50 % цемента и 50 % молотого гранулированного доменного шлака, природных заполнителей и песка, в который добавлялись дробленые известняковые отходы в количестве 10 % и 20 %. Исследованиями прочности бетона на сжатие установлено, что показатели прочности оказались примерно на 4-12 % выше по сравнению с контрольным образцом. Показано, что повышение прочности и долговечности бетонов, содержащих до 20 % известняковых отходов, делает их более приемлемым материалом для крупных строительных проектов, а также позволяет использовать отходы массового производства в полезных целях и снизить проблемы их утилизации.

В исследовании [194] применяли побочный продукт (медный шлак), получаемый при производстве штейна и рафинировании меди. Шлак использовали при изготовлении бетонных смесей в качестве частичного заменителя песка и в роли суперпластификатора, который является важным компонентом высокопрочного бетона, обеспечивающим его высокие характеристики прочности и долговечности, технологичности, хорошей обрабатываемости и оптимальную консистенцию бетонной основы. При этом в [198-203] констатировалось, что прочность на сжатие и растяжение бетонных образцов, изготовленных с использованием медного шлака в качестве мелкого и крупного заполнителя, выше, чем у обычного бетона [200; 201; 204-206].

В [198-201] сообщается о более длительной задержке времени схватывания бетона из-за уменьшения в размере частиц медного шлака. Констатируется, что в бетоне, содержащем более 40 % медного шлака в качестве заменителя мелкого заполнителя, наблюдаются его проседание и расслоение. При этом указанный эффект объясняется стекловидной

поверхностью шлака и его низким влагопоглощением. Параллельно указывается на повышение износостойкости цементного раствора, содержащего в качестве модификатора медный шлак. Установлено [201], что шлаки, подвергшиеся определенным видам термической обработки, обладают более высокой активностью, а добавки термообработанных шлаков к портландцементу повышают объем химически связанной воды, что усиливает степень гидратации клинкерных минералов, повышая прочность бетона. Объясняется этот эффект тем, что термоактивированный шлак инициирует зарождение дополнительных центров кристаллизации, преобразующих структуру цемента и приводящих к изменению его физико-механических свойств.

В [193] исследованы способы повышения прочности бетонов путем подключения органо-минерального модификатора и композиционных вяжущих, содержащих вулканогенно-осадочные породы Камчатки.

Представляло интерес изучение данного вопроса с экспериментальным выявлением оптимальных концентраций модифицирующих элементов бетонной композиции.

1.3.3. Армирующие волокна

Среди новых видов бетонов все большее распространение получает фибробетон [207 - 209] – композитный материал на основе цемента, армированный отдельными волокнами, которые могут быть распределены хаотично. Волокна различаются по форме, размеру и материалу изготовления: сталь, стекло, искусственные и природные полимеры [210].

Основной функцией армирующих волокон в бетоне является повышение механических характеристик материала. Присутствующие в бетоне волокна увеличивают прочность на растяжение и изгиб, а также ударную прочность, что позволяет создавать более долговечные и устойчивые к механическим нагрузкам конструкции. Фибробетон обладает повышенной пластичностью, что важно для уменьшения вероятности образования трещин [211].

Следует отметить, что наличие в составе бетона некоторых типов волокон (таких, как стальные, синтетические, асбестовые и др.) сопряжено с рядом проблем. Так, например, стальные волокна могут подвергаться коррозии, что снижает долговечность конструкций. Синтетические волокна могут выделять вредные вещества при воздействии высоких температур. Волокна из асбеста, несмотря на высокую прочность, представляют опасность для здоровья человека из-за своих канцерогенных свойств [212]. Кроме того, производство фибробетона требует значительных энергетических затрат. Вероятно, в будущем перспективным направлением развития фибробетона может стать использование более экологичных материалов для армирования, а также разработка технологий, направленных на снижение энергоемкости производства и минимизацию негативного воздействия на окружающую среду.

Необходимость утилизации сельскохозяйственных отходов (таких, как кукурузная, льняная и пшеничная солома, рисовая шелуха, сизаль, бамбуковые листья и стебли и др.) часто приводит к загрязнению окружающей среды, особенно при их сжигании [216; 217]. Однако использование этих отходов в строительстве позволяет достичь двойной экологической выгоды [218 ;219], поскольку натуральные волокна при их использовании приносят дополнительные экономические и экологические преимущества [221]. С другой стороны, волокна природного происхождения представляют собой альтернативный возобновляемый материал, способствуя созданию экологически чистых и энергоэффективных инженерных решений при армировании бетона. Относительно новым направлением в строительстве является разработка различных типов фибробетона, в котором в качестве армирующих элементов используются натуральные волокна [222; 211-221;223].

Рост популярности натурального фибробетона в строительной индустрии обусловлен его способностью улучшать общие механические

свойства композитной матрицы [224], повышать прочность на разрыв [225; 226] и сжатие [227; 228] по сравнению с традиционным бетоном.

Так, например, волокна сизаля обладают высокой прочностью на растяжение, модулем упругости, хорошими тепло- и акустическими свойствами, низкой стоимостью, доступностью и отсутствием риска для здоровья [211; 223]. Использование волокон сизаля в качестве арматуры в бетоне улучшает общие механические свойства композитной матрицы [224]. Прочность фибробетона на разрыв играет важную роль в повышении трещиностойкости бетона. Экспериментально установлено [225; 226], что добавление в его состав определенных типов натуральных волокон значительно увеличивает этот показатель. Сравнение эксплуатационных показателей натурального фибробетона с обычным бетоном показала [227; 228], что первый обладает улучшенными характеристиками прочности на сжатие и долговечность. В [229-231] установлено, что гибридные волокна повышают долговечность и механические свойства бетона, улучшают его прочность при ударе и пластичность при деформации. Так, использование смеси волокон из кокосовой шелухи и поливинила в геоплимерных композитах повышает пластичность и ударопрочность последних на 60%.

Анализ свойств натурального фибробетона показывает, что волокна природного происхождения снижают скорость растрескивания материала. Пористая структура волокон и их взаимодействие с бетонной матрицей способствуют увеличению прочности на разрыв. Повышение количества волокон в составе бетонной смеси приводит к снижению её плотности, что, в свою очередь, уменьшает теплопроводность и скорость распространения звуковых волн. Вследствие этого натуральный фибробетон обладает улучшенными тепло- и звукоизоляционными свойствами [232]. В качестве примера, низкая теплопроводность волокон багассы обеспечивает более высокую теплоизоляцию геоплимерных композитов [231].

Использование натуральных волокон в составе бетонной смеси способствует более равномерному распределению напряжений внутри

бетонной конструкции, повышая её устойчивость к механическим воздействиям и ударным нагрузкам [233].

Натуральный фибробетон, включающий: кукурузную шелуху и волокна [234 - 239], пшеничную солому [240 - 246], рисовую шелуху [247 - 263], льняные волокна [264 - 272], банановое волокно [273 - 279]; кокосовое волокно и скорлупу [280 - 287], бамбуковые волокна [288 - 295] представляет собой экологически и экономически эффективную альтернативу традиционному бетону.

С другой стороны, в [296] установлено, что низкая плотность и высокая пористость бетона, достигаемая при введении в его состав натуральных волокон, приводит к снижению прочности на сжатие, одного из ключевых параметров при эксплуатации зданий и сооружений. Следует также отметить, что у бетона, приготовленного с добавками рисовой шелухи, наблюдается значительное снижение показателей прочности при сжатии и изгибе по сравнению с бетоном, составленным по традиционной рецептуре [297 - 299]. Кроме того, высокая впитывающая способность натуральных волокон ограничивает их долговечность в бетонных конструкциях, особенно в условиях повышенной влажности и биологического разложения [300 - 302].

В целом можно констатировать, что в последние годы применение сельскохозяйственных отходов при производстве бетона еще более расширилось. При этом натуральный фибробетон обладает рядом преимуществ, способных улучшить механические свойства и тепло-звуко-изоляционные характеристики. Однако для его широкого применения необходимо учитывать экологические аспекты и технологические особенности его производства и эксплуатации. Последнее позволяет заключить, что применение сельскохозяйственных отходов для повышения механических характеристик бетонов неприемлемо для климатических условий РФ.

В этой связи представляет интерес рассмотрение возможности использования в качестве модификатора бетонов оборотных строительных отходов.

1.4. Рециклинг строительных отходов и их экологическое воздействие на окружающую среду

Одним из перспективных направлений использования техногенных строительных отходов является производство строительных материалов. Первое значительное решение, связанное с формированием свода правил в области обращения с отходами строительства в РФ, было принято только в 2022 году [303]. В результате была представлена примерная номенклатура отходов, являющихся вторичными ресурсами, и приоритетные направления их использования [304]. Принятый позднее Федеральный проект «Экономика замкнутого цикла» предусматривает к 2030 году возвращать в производство до 40% образующихся в строительстве отходов. В этой связи проведенная количественная оценка реальных объемов строительных отходов и мусора в России показала цифры в пределах 70-96 миллионов тонн в год [305]. Согласно статистическим данным, представленным компанией «СМПРО», объем производства строительного кирпича в Российской Федерации в 2024 году составил 7 550 миллионов условных кирпичей. В соответствии с требованиями ГОСТ, в партии кирпича допускается наличие до 5% брака. Дополнительно, в процессе транспортировки и хранения кирпичной продукции может образоваться до 4% боя. Следовательно, суммарный объем брака в производстве и логистике строительного кирпича может достигать 679 миллионов условных кирпичей в год. Считается, что их эффективное использование будет способствовать значительному ресурсосбережению и улучшению экологической обстановки. Так, в работе [306] показано, что замена 70 % цемента натуральными заполнителями из переработанных строительных отходов значительно улучшает состояние окружающей среды. При этом показано [307], что вторично переработанный бетон представляет

собой более экологичный материал, чем бетон традиционной рецептуры. Однако, результаты работы [308] указывают на то, что обычный бетон и бетон со 100 % переработанными заполнителями могут оказывать одинаковое воздействие на окружающую среду при одинаковом содержании цемента. При этом их потенциалы выбросов углекислого газа в атмосферу незначительно отличаются друг от друга [309]. Данные результаты связаны с низкими механическими свойствами бетона, полученного с применением переработанных заполнителей, что требует увеличения содержания цемента для компенсации снижения качества бетона.

В современной строительной отрасли наблюдается активное развитие технологий переработки техногенных отходов, что способствует эффективному преобразованию вторичных ресурсов в готовую продукцию. Следует отметить, что помимо экологических преимуществ, широкое использование оборотных строительных отходов формирует важные статьи экономии, включающей:

- сохранение средств, связанных с захоронением отходов и обслуживанию свалок,
- корректировку объемов добычи полезных ископаемых,
- снижение производственных и транспортных расходов, особенно при переработке отходов на месте.

Таким образом, бетон, модифицированный оборотными строительными отходами, может заведомо обладать конкурентными экономическими и экологическими преимуществами по сравнению с традиционным бетоном, что делает его перспективным материалом для использования в строительстве.

1.5. Выводы по главе и обоснование направлений экспериментальных исследований

Представленный анализ литературных источников показал следующее:

1. Введение дисперсных добавок в состав бетонной смеси позволяет создавать новые виды бетонов с заданными эксплуатационными свойствами.

При этом дисперсное модифицирование значительно улучшает механические свойства бетона, такие как прочность, устойчивость к трещинообразованию и долговечность;

2. Механические характеристики бетонных смесей, модифицированных различными компонентами, связаны с химическим составом, структурой, объемом и фракционным размером дисперсных добавок. При этом наибольшую эффективность в применении демонстрируют тонкодисперсные добавки, которые приводят к формированию более плотной структуры бетонной композиции, улучшая тем самым ее механические свойства;

3. Современные тонкодисперсные добавки отличаются разнообразием свойств и технологий получения бетона. При этом по отношению к компонентам бетонной смеси они могут быть химически активными и нейтральными.

4. Установлено, что наномодифицированные бетоны демонстрируют повышенные механические свойства, но их производство сопряжено с более высокими затратами по сравнению с традиционными материалами, что обусловлено необходимостью использования специализированного и дорогостоящего оборудования для синтеза наночастиц.

5. Показано, что в последние годы предпочтение отдается модификаторам, полученным из отходов металлургического, сельскохозяйственного производств и предприятий энергетического комплекса. Это позволяет не только снизить стоимость добавок, но и минимизировать негативное воздействие промышленности на окружающую среду.

6. Обзор литературных источников также обозначил актуальность проблемы утилизации промышленных отходов строительного производства, решению которой может способствовать эффективное использование строительных отходов непосредственно в строительной отрасли. В настоящее время строительные отходы в основном применяются в качестве заполнителей бетонных смесей, а не в составе цементных композиций.

7. Перспективным направлением исследования дисперсно-модифицированных бетонов является изучение влияния дисперсных добавок, полученных из отходов строительной промышленности, таких как бой кирпича. Дисперсные добавки подобного рода могут значительно улучшить механические характеристики бетонов при минимальных затратах.

8. На основании критического обзора литературы были поставлены следующие задачи исследования:

- 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 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 бетонных смесей.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Характеристики используемых материалов

В рамках экспериментальных исследований для составления исходной бетонной смеси были использованы следующие компоненты: цемент, песок, щебень, вода. Физические характеристики и химический состав материалов для составления бетонной смеси представлены в таблицах 2.1–2.3.

Таблица 2.1 – Физико-химические характеристики мелкого заполнителя (строительный кварцевый песок [310])

Наименование параметра	Значение параметра
Насыпная плотность; кг/м ³	1630
Истинная плотность; кг/м ³	2600
Содержание пылевидных и илистых частиц; %	0,20
Содержание глины в комках; %	0
Наличие органических примесей	нет
Содержание вредных примесей	нет

Таблица 2.2 – Физико-химические характеристики крупного заполнителя (щебень фракцией -20+5 мм [311])

Наименование параметра	Значение параметра
Насыпная плотность; кг/м ³	1400
Истинная плотность; кг/м ³	2660
Содержание пылевидных и илистых частиц; %	0,96
Содержание глины в комках; %	нет
Содержание зерен пластинчатой лещадной формы; %	19,1

Таблица 2.3 – Химический состав цемента (ПЦ 500 Д0 [312])

Компоненты смеси	Содержание, %
оксид кремния	21,55
оксид кальция	65,91
оксид алюминия	5,55
оксид железа	4,7
ангидрид серной кислоты	1,9
оксид магния	1,46
оксид калия	0,35
потери при прокаливании	0,49

В качестве модификатора бетона был выбран дисперсный порошок (ДП), полученный путем тонкого измельчения отходов строительного кирпича различных марок (таблица 2.4). Образцы продуктов помола представлены на

рисунке 2.1. Эффективность процесса измельчения оценивали методом ситового анализа.

Таблица 2.4 – Материал для получения модификаторов бетонной смеси

Облицовочный кирпич гладкий Браер 0,7 NF (образец №1), прочность на сжатие — 19 МПа (ГОСТ Кирпич и камень керамический 530-2019)	
Шамотный кирпич ШБ-5 (образец №2), прочность на сжатие — 19 МПа (ГОСТ Кирпич и камень керамический 530-2019)	
Облицовочный кирпич М 200 1NF (образец №3), прочность на сжатие — 19 МПа (ГОСТ Кирпич и камень керамический 530-2019)	



Рисунок 2.1 – Внешний вид полученных порошков

2.2. Методика и оборудование для получения порошков

В экспериментах дисперсный порошок представлял собой продукт тонкого помола фракцией размером $-3+0$ мм. Порошок получали измельчением образцов кирпичного боя в шаровой мельнице с разделением продукта помола на лабораторных ситах с ячейками размером (мм): 1,5; 0,63; 0,315; 0,08; 0,045 и 0,026.

Для измельчения строительных отходов использовали двухпозиционную шаровую мельницу типа WiseMix BML-2 (рис. 2.2),

предназначенную для получения мелкодисперсных фракций обрабатываемого материала. Оптимальный коэффициент заполнения ϕ барабана мельницы размольными телами составляет 0,4–0,5. Рабочие характеристики мельницы представлены в таблице 2.5.



Рисунок 2.2 – Мельница типа WiseMix BML-2

Таблица 2.5 – Технические характеристики мельницы WiseMix BML-2

Питание	220 В, 50 Гц
Мощность	40 Вт
Габариты	620x300x515 мм
Масса	52 кг
Таймер	До 100 ч
Количество мест	2
Скорость вращения	50...600 об./мин

Для получения порошков ультрадисперсных фракций использовали планетарную мельницу РМ-400 (рисунок 2.3), технические параметры которой

представлены в таблице 2.6. В экспериментах в качестве мелющих тел применялись шары массой 1,5 г и диаметром 5 мм, изготовленные из карбида вольфрама.

Таблица 2.6 – Технические характеристики планетарной мельницы РМ 400

Осуществляемые операции	измельчение, смешивание, гомогенизация, коллоидное измельчение
Измельчаемый материал	мягкий, твердый, хрупкий, волокнистый - сухой или влажный
Принцип измельчения	удар, трение
Исходный размер частиц	< 10 мм
Конечная тонкость	<1 мкм, <0,1 мкм (для коллоидного измельчения)
Количество рабочих программ	10
Скорость вращения планетарного диска	30 - 400 об/мин
Объем партии / объем загрузки	880/160 мл
Материал мелющих тел	закаленная сталь, нержавеющая сталь, карбид вольфрама, агат, спеченный корунд, оксид циркония
Объем размольных стаканов, мл	50 / 80 / 125 / 250 / 500
Масса мелющих тел	400 г на 80 г порошка



Рисунок 2.3 – Планетарная мельница типа РМ-400

2.3. Изучение гранулометрических характеристик материалов

Изучение гранулометрических составов полученных порошков осуществляли методом рассева материала на стандартном наборе сит с размерами ячеек: 1,5мм, 0,63 мм, 0,315 мм, 0,08 мм, 0,045 мм и 0,026 мм [313]. Рассев каждой порции порошка проводили на вибростоле (рисунок 2.4), продолжительность рассева составляла 15 минут. Технические характеристики вибростола представлены в таблице 2.7. Эксперимент повторяли трижды, принимая за результат средние значения показателей.

Таблица 2.7 – Технические характеристики лабораторного вибростола

частота вертикальных колебаний, мин ⁻¹	2900
амплитуда вертикальных колебаний, мм	0,5± 0,05
амплитуда горизонтальных колебаний, мм	не более 0,1
отклонение амплитуд колебаний периферии вибростола от центра, %	не более 20



Рисунок 2.4 – Вибростол с лабораторным набором сит

2.4. Изучение структурного и химического содержания дисперсных и ультрадисперсных порошков

Анализ структур дисперсных (ДП) и ультрадисперсных порошков (УДП) проводили с использованием растрового электронного микроскопа высокого разрешения JEOL JSM-6480LV (рисунок 2.5), позволяющего выполнять качественный и количественный анализ состава и структуры мелкодисперсных материалов на основе метода энергодисперсионной спектроскопии. Технические характеристики прибора представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Технические характеристики электронного микроскопа типа JEOL JSM-6480LV

Разрешение в режиме высокого вакуума	3 нм при 30 кВ, 8 нм при 3 кВ, 15 нм при 1 кВ
Разрешение в режиме низкого вакуума	4 нм при 30 кВ
Ускоряющее напряжение	от 0,3 до 30 кВ
Диапазон увеличений	от х8 до х300 000 при >11 кВ от х5 до х300 000 при <10 кВ
Виды контраста	вторичные электроны: топографический контраст отражённые электроны: композиционный, топографический, теневой контрасты.
Тип катода	вольфрамовый (W) или из гексаборида лантана (LaB6), предварительно сцентрированные на заводе
Конденсорная линза	с переменным фокусным расстоянием
Объективная линза	суперконического типа
Диафрагма объективной линзы	три ступени, с подстройкой по координатам X и Y
Столик образцов	большой, эвцентрического типа, диапазон перемещений: по координатам: X 125 мм, Y 100 мм, Z - от 5 до 80 мм. наклон: от -10 до +90 градусов, вращение 360 градусов
Моторизация перемещения столика	до 5 осей с компьютерным управлением (опция)
Операционная система	Windows

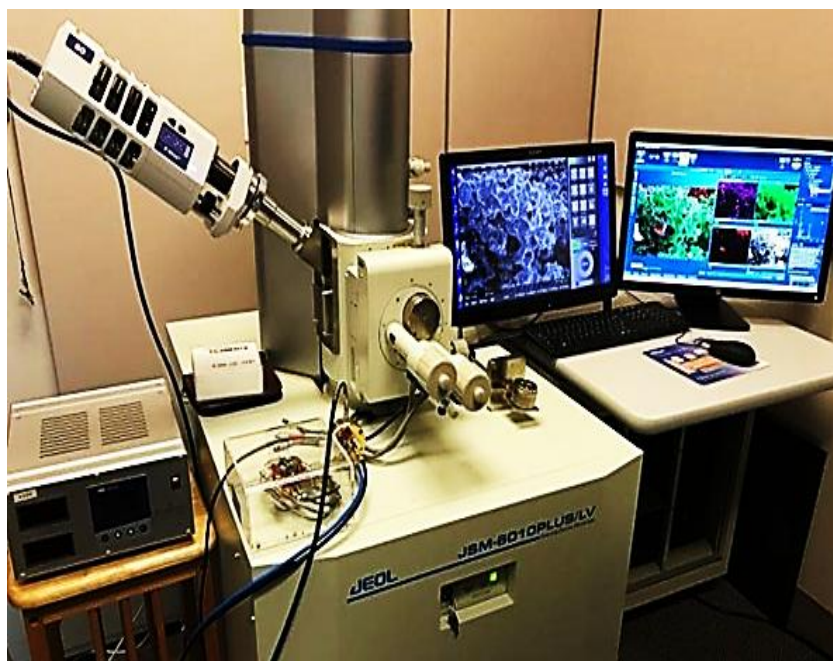


Рисунок 2.5 – Растровый электронный микроскоп JEOL JSM-6480LV

Гранулометрические характеристики ультрадисперсных порошков изучали, используя лазерный анализатор FritschParticleSizer «Analysette 22» (рисунок 2.6), основные технические характеристики которого представлены в таблице 2.9.



Рисунок 2.6 – Лазерный анализатор FritschParticleSizer «Analysette 22»

Таблица 2.9 – Технические характеристики анализатора типа FritschParticleSizer «Analysette 22»

Диапазон измерения	0,5 – 1500 мкм
Метод анализа	Дифракция лазерного луча
Максимальное разрешение	520
Воспроизводимость	$d_{50} \leq 1 \%$ (ISO 13320)
Оптические методы расчета	Фраунгофер
Длина волны лазера	520 нм
Распознавание формы частицы	Да
Оптическая конструкция	Инверсная конструкция Фурье

Химический состав полученных ДП и УДП определяли методом рентгено-спектрального микроанализа с использованием прибора JXA-8230 SUPERPROBE (JEOL) (рисунок 2.7), технические характеристики которого представлены в таблице 2.10.



Рисунок 2.7 – Аппарат рентгеноспектрального микроанализа типа SUPERPROBE

Таблица 2.10 – Технические характеристики микроанализатора типа JXA-8230 SUPERPROBE (JEOL)

Диапазон анализируемых элементов	от 4(Be) до 92(U)
Диапазон длин волн	от 0,087 до 9,3 нм
Количество волновых спектрометров	от 1 до 5
Энергодисперсионный спектрометр	1 (встроена безазотная система ЭД микроанализа)
Диапазон перемещения столика образцов	по оси X и Y: 100 мм, 100 мм
Точность позиционирования образца	0,5 мкм
Максимальный размер образца	100 мм x 100 мм x 50 мм
Анализируемая область	90 мм x 90 мм
Скорость сканирования столиком образцов	15 мм/сек
Ускоряющее напряжение	От 1 до 30 кВ (с шагом 0,1 кВ)
Ток зонда	от 10^{-12} А до 5×10^{-5} А
Минимальный диаметр зонда	40 нм (10 кВ, 10^{-8} А) 100 нм (10 кВ, 10^{-7} А)
Разрешение во вторичных электронах	6 нм (для W катода) и 5 нм для LaB ₆ , при 30 кВ, на рабочем отрезке 11 мм
Изображение в отражённых электронах	топографический и композиционный контраст
Увеличение в режиме сканирования	от 40 до 300 000х

2.5. Получение образцов бетона, модифицированного дисперсными порошками строительных отходов

Для оценки влияния эффекта модифицирования цементных растворов дисперсными порошками (ДП) строительных отходов были изготовлены и испытаны на прочность образцы кубической формы с длиной ребра 70 мм (314). Испытания проводили сериями по 5 штук в каждой. Перед смешиванием материалы хранили при комнатной температуре $22 \pm 2^\circ\text{C}$ в течение не менее 24 часов для выравнивания температуры. Материалы (цемент и ДП) загружали в смеситель и перемешивали в сухом состоянии. Затем смешивали крупный и мелкий заполнители в сухом состоянии. Обе смеси объединяли и продолжали перемешивание до достижения однородности состава. В полученную смесь порциями подавали воду, после чего смесь снова перемешивали для достижения однородной дисперсии частиц.

Бетонная смесь для приготовления контрольного образца была составлена без добавления ДП. В остальных образцах цемент был частично заменен на различные доли ДП для получения модифицированных составов

бетона. Полученную массу укладывали в разъемную форму (рисунок 2.8) и уплотняли на лабораторной виброплощадке (рисунок 2.4).



Рисунок 2.8 – Разъемная форма для заливки бетонной смеси

После завершения процесса укладки и уплотнения бетонной смеси поверхность образцов подвергалась заглаживанию с использованием мастерка. Образцы накрывали полиэтиленовой пленкой для предотвращения потери влаги в процессе твердения и выдерживали при температуре 20°C в течение 24 часов. По истечении этого времени образцы извлекали из форм и перемещали в специализированную камеру для твердения при нормальных условиях. Твердение образцов продолжалось в течение 28 суток.

После окончательного набора твердости образцы выдерживали в течение 24 часов при температуре около 22°C и относительной влажности воздуха 50% не менее 24 часов. Перед проведением испытаний образцы подвергались визуальному осмотру для выявления возможных дефектов, таких как трещины, сколы, расслоение или недоуплотнение (рисунок 2.9). Обнаруженные наплывы на ребрах опорных поверхностей удалялись с помощью абразивного камня.

На каждом образце определяли опорные грани, на которые будут действовать усилия в процессе нагружения. Опорные грани выбирались таким

образом, чтобы направление сжимающей силы пресса соответствовало параллельному расположению слоев укладки смеси в форму. Завершающим этапом подготовки образцов было их взвешивание на лабораторных весах.

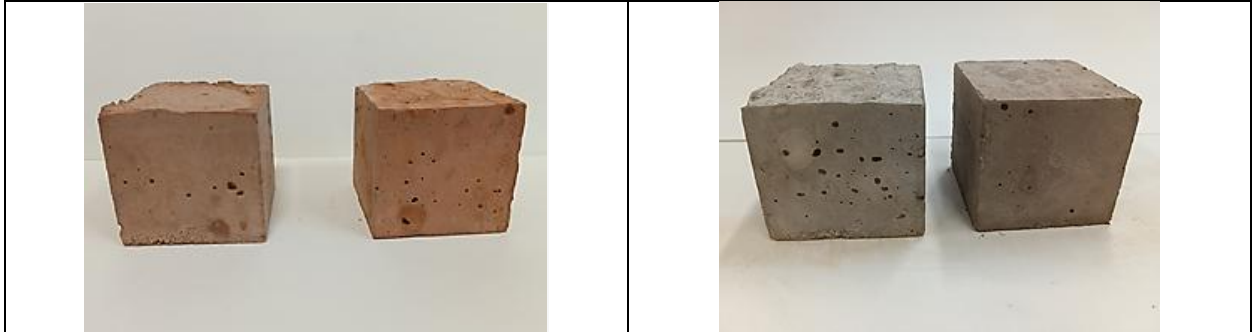


Рисунок 2.9 – Образцы бетона для испытаний

2.6. Методика испытаний прочности образцов бетона на сжатие

Для определения механических свойств затвердевшего бетона были проведены испытания на прочность при сжатии и скорость распространения ультразвукового импульса (UPV). Эксперименты осуществлялись с образцами в возрасте 7, 14, 21 и 28 суток, в трех повторениях (рисунок 2.10). В дальнейшем анализе использовалось среднее значение из трех результатов.

Эксперименты проводили на лабораторном прессе MATEST (рисунок 2.10), который оснащён рамой и датчиком нагрузки, позволяющим проводить испытания с давлением на образец усилием до 1500 кН. Установка оборудована монитором, при помощи которого задавались необходимые параметры испытания образца, такие, как: скорость и единицы измерения тестируемого параметра, тип испытания, тип и размеры образца, и начальное значение нагрузки.

В ходе эксперимента осуществлялась непрерывная запись данных с частотой дискретизации 0,05 секунды. Запись продолжалась до завершения эксперимента, охватывая более 1000 экспериментальных точек. Полученные данные подвергались обработке, в результате которой строились графические зависимости прикладываемой нагрузки от времени.

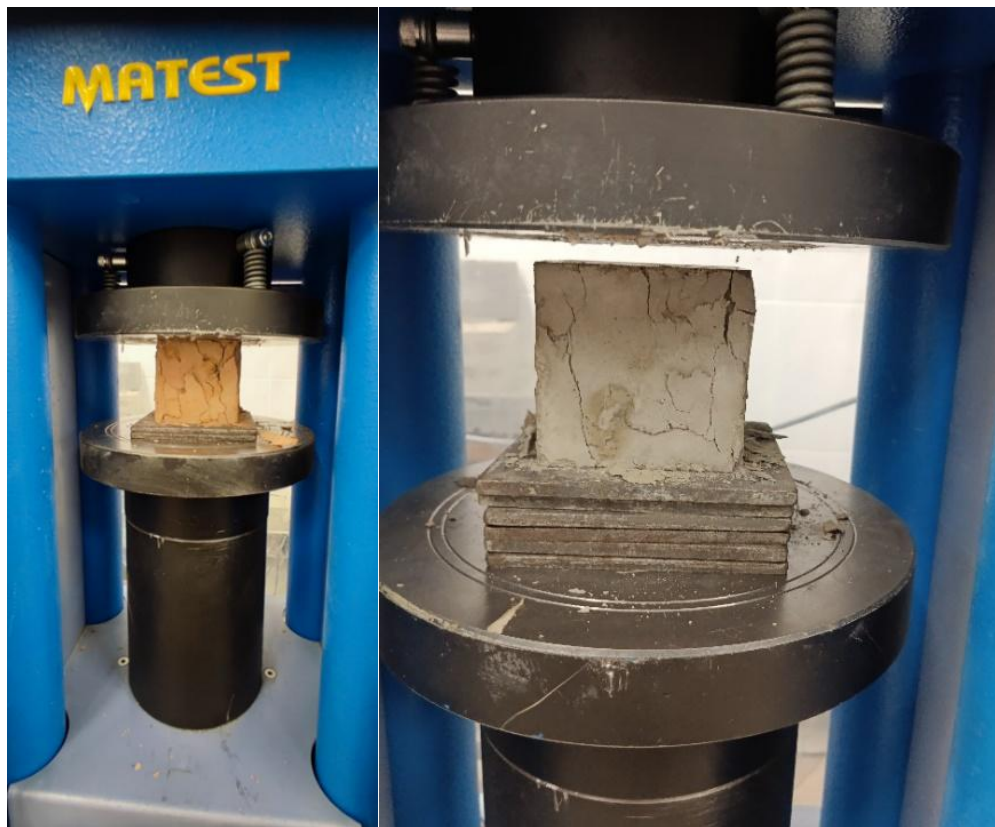


Рисунок 2.10 – Проведение эксперимента на сжатие

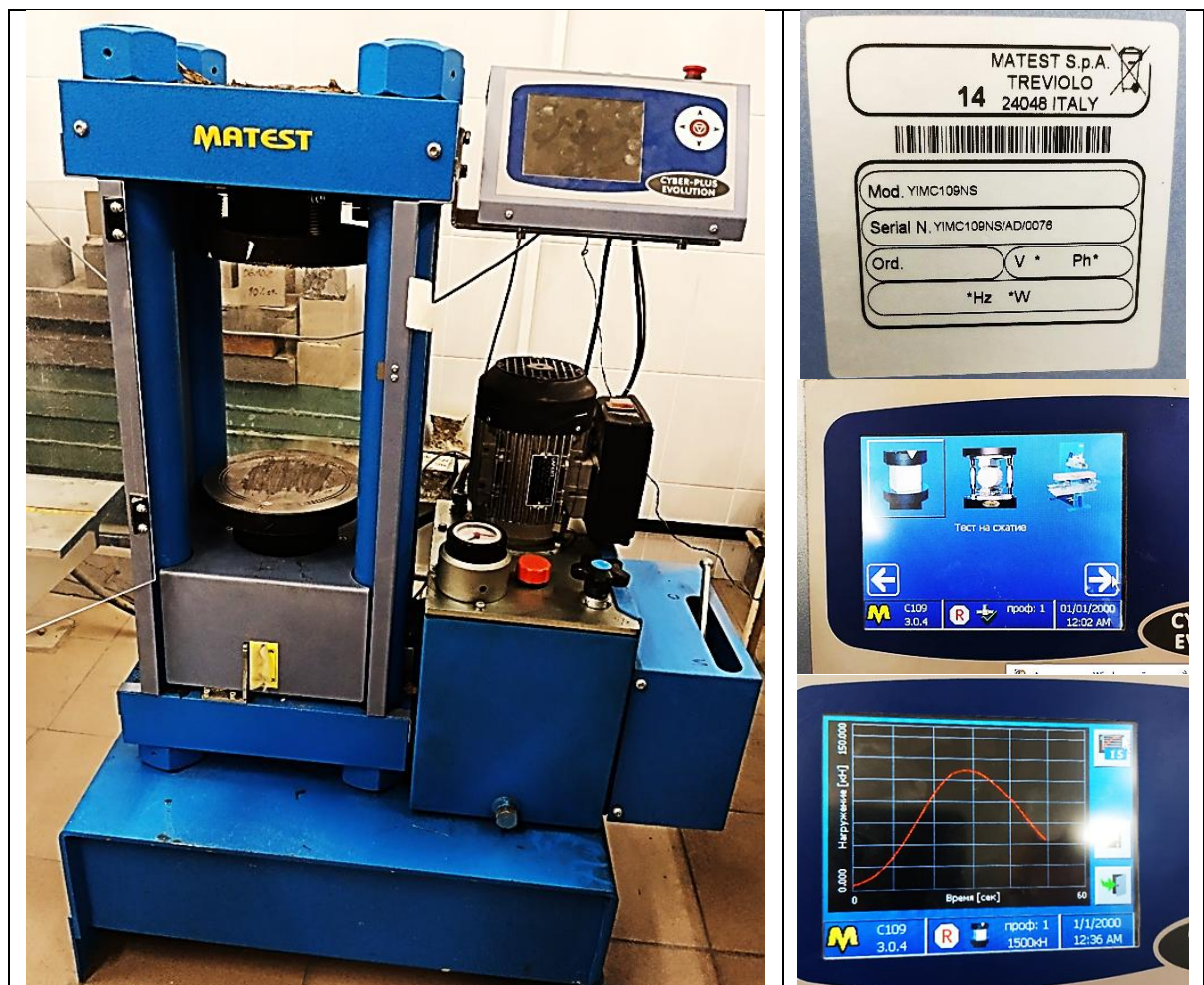


Рисунок 2.11 – Установка «Пресс лабораторный MATEST» с интерфейсным блоком

2.7. Методика оценки модуля упругости образцов бетона

Для оценки динамического модуля упругости бетона применяли метод ультразвукового импульсного контроля скорости (UPV) с использованием ультразвукового прибора ПУЛЬСАР-1.1. Этот прибор предназначен для выявления пустот, трещин и дефектов в бетонных конструкциях, контроля их прочности и однородности [315, 316], а также анализа состояния строительных и композиционных материалов. Методика ультразвукового импульсного контроля относится к неразрушающим методам контроля, основанным на измерении скорости прохождения ультразвуковых импульсов через исследуемый материал. Различия в скорости ультразвуковых волн в материалах с разной плотностью и пористостью позволяют оценить их механические свойства, в частности, модуль упругости. В зависимости от целей испытаний, ультразвуковое исследование может проводиться различными способами прозвучивания образца: сквозным, угловым или поверхностным. Каждый из этих способов имеет свои особенности и области применения, что позволяет получать более точные и достоверные результаты в зависимости от конкретных задач (рисунок 2.12).

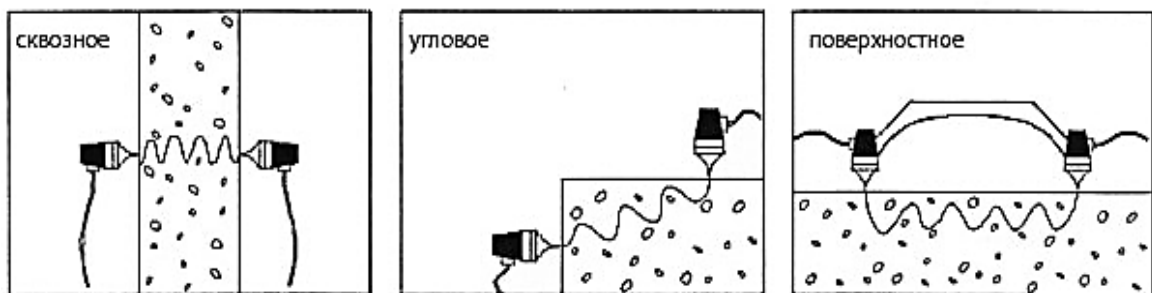


Рисунок 2.12 – Способы исследования образцов методом ультразвукового импульсного контроля скорости

Для определения механических характеристик бетона использовали метод сквозного соосного прозвучивания (рисунок 2.13). Для этого при измерении времени распространения ультразвуковых волн ультразвуковые преобразователи размещали на противоположных сторонах исследуемого образца [315].

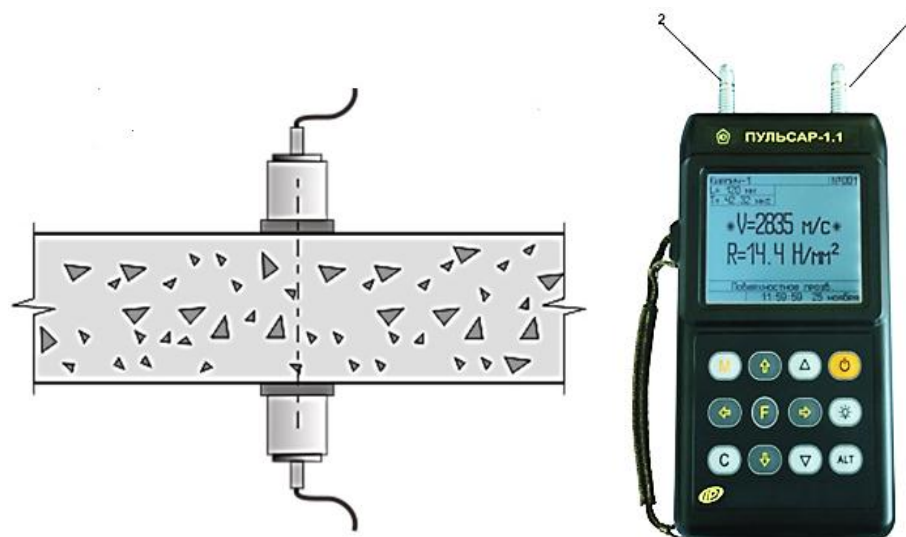


Рисунок 2.13 – Схема испытания бетона ультразвуковым методом и вид электронного блока:

1 и 2 – вход и выход приемного и излучающего преобразователя, соответственно

Скорость распространения ультразвуковых волн V , м/с, вычисляли по формуле (2.1):

$$V = (l/t) \cdot 10^2, \quad (2.1)$$

где t – время распространения ультразвука, мкс.

2.8. Методика анализа морфологии поверхности, химического состава и микроструктуры образцов бетона

Анализ морфологии поверхности и микроструктуры образцов бетона проводили, используя электронный сканирующий микроскоп (СЭМ) типа Hitachi SU8010 с приставкой X-max N80 (рисунок 2.14), опираясь на соответствующие рекомендации [317]. Технические характеристики микроскопа представлены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Технические характеристики микроскопа Hitachi SU8010

Разрешение, нм	1,5
Ускоряющее напряжение, кВ	0,1-30
Увеличение, крат	20-800 000
Тип электронной пушки	холодный катод с полевой эмиссией
Детекторы вторичных электронов	сцинтиллятор-фотоумножитель с возможностью микширования сигналов



Рис. 2.14 – Микроскоп электронный сканирующий SU8010, Hitachi, Япония

ИК-спектры полученных бетонных образцов регистрировали на ИК-Фурье спектрометре Shimadzu IRSpirit в диапазоне волновых чисел 400-4000 см^{-1} . Технические характеристики спектрометра представлены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Технические характеристики ИК-Фурье спектрометра Shimadzu IRSpirit

Интерферометр	Интерферометр Майкельсона с углом падения 30° , оснащенный передовой системой динамического выравнивания. Осушаемый интерферометр
Оптическая система	Однолучевая; с юстируемыми оптическими элементами
Детектор	Термостабилизированный детектор DLATGS
Светоделитель	Пластина KBr с германиевым покрытием
Источник света	Высокотемпературный керамический с гарантией на 3 года
Макс. Разрешение	$0,9 \text{ см}^{-1}$
Операционная система	Windows 7 Professional 32/64-bit Windows 10 Pro 64-bit

Фазовый состав образцов бетона определяли при помощи рентгенографического фазового анализа, выполненном с использованием рентгеновского дифрактометра TD-3700, технические характеристики которого представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12 – Технические характеристики рентгеновского дифрактометра TD-3700

Высоковольтный генератор	Максимальная мощность (КВт)	3
	Диапазон напряжения (КВ)	10 - 60
	Диапазон тока (мА)	5 - 50
Рентгеновские трубки	Материал анода	Cu, Fe, Co, Cr, Mo, W
	Размер фокального пятна (LFF, мм)	0,4 x 14
	Мощность (КВт)	2,4
	Охлаждение трубки	Водяное
Гониометр	Конфигурация	Вертикальный, Θ - Θ
	Радиус	Изменяемый в диапазоне 185-300 мм
	Диапазон углов по 2Θ (°)	-110 - +161
	Минимальный шаг по углу (°)	0,0001
	Линейность по 2Θ во всём диапазоне углов (°)	$\pm 0,001$
	Диапазон скорости сканирования (°/мин)	0,0012 - 120
Оптические модули	Прямой пучок, линейный фокус	• Фиксированные щели, щели Соллера • Монохроматор по Иоганссону
	Дифрагированный пучок	• Набор приёмных и антирассеивающих щелей • Приставка с модулем формирования параллельного пучка и графитовым монохроматором для изучения тонких плёнок
Полупроводниковый детектор MYTHEN2 1D	Число каналов	640
	Ширина канала (мкм)	50
	Максимальная скорость счёта (имп./с)	109
	Уровень шума (имп./с)	Менее 0,5
	Энергетическое разрешение (эВ)	687
	Режимы работы	Линейный (1D)

2.9. Обработка экспериментальных данных

Все представленные в работе исследования проведены с использованием метода математического планирования, дисперсионной и регрессионно-корреляционной обработкой полученных данных на ЭВМ.

Для проверки адекватности разработанных регрессионных моделей использовался F-критерий Фишера:

$$F = (S_{ad}/S_y)^2 \quad (2.2)$$

$$S_{ad}^2 = \sum_{j=1}^n dy_j^2 / f_c \quad (2.3)$$

$$S_y^2 = \sum (y_i - y_c)^2 / (n - 1) \quad (2.4)$$

где y_i – результат отдельного опыта; y_c – среднее арифметическое значение повторных экспериментов; n – число повторных экспериментов; f_c – число степеней свободы.

Результаты многофакторных исследований, представленные в работе, прошли математическую обработку на ЭВМ, представляющую собой отсев промахов измерений, проверку выборок на нормальность распределения, дисперсионный и регрессионно-корреляционный анализ.

При разработке уравнений множественной регрессии их адекватность проверялась по величине F-критерия Фишера:

$$F = D_{факт} / D_{ост} = R^2 / ((1 - R^2)(n - m - 1) / m), \quad (2.5)$$

где $D_{факт}$ и $D_{ост}$ – факторная и остаточная сумма квадратов отклонений на одну степень свободы; R^2 – коэффициент (индекс) множественной детерминации; m – число параметров при переменных x (в линейной регрессии совпадает с числом включенных в модель факторов); n – число наблюдений.

При изучении процесса измельчения в качестве ключевых регулируемых параметров принимали: скорость вращения мельницы, продолжительность измельчения и отношение массы мелющих тел к массе измельчаемого материала. Основными критериями выбора функции, наиболее

точно описывающей зависимость эффективности процесса от указанных параметров, являлись максимальные значения достоверности аппроксимации (R^2) и экспериментального критерия Фишера ($F_{эксн}$), а также минимальная вероятность ошибки (α).

Для построения математических моделей процессов и обработки экспериментальных данных использовали метод Брандона [318]. Метод Д.Б. Брандона основан на предположении о слабой корреляции между исследуемыми переменными. Сущность этого метода заключается в том, что нелинейную функцию (Y) предлагается искать в виде произведения

$$Y = \alpha_0 \cdot f(x_1) \cdot f(x_2) \cdot \dots \cdot f(x_n), \quad (2.6)$$

в котором каждая из функций $f(x_i)$ считается функцией только одного аргумента с номером i .

В уравнении (2.6) α_0 – уточняющий коэффициент модели; $f(x_1) \cdot f(x_2) \cdot \dots \cdot f(x_n)$ – зависимости отклика функции от каждого из регулируемых параметров процесса.

2.10. Выводы по главе

Все эксперименты, приведенные в работе, были выполнены в соответствии со стандартными методиками испытаний, на аттестованном оборудовании с использованием современных методов рентгенофазового, спектрального, ультразвукового анализа и сканирующей электронной микроскопии. Достоверность полученных результатов подтверждается достаточным количеством проведенных экспериментов и последующей корректной обработкой полученных данных [314, 319, 320].

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ МЕХАНИЧЕСКОЙ ДЕЗИНТЕГРАЦИЕЙ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

3.1. Характеристика и классификация порошковых материалов

На основании обзора литературных источников сделан вывод о перспективности применения дисперсных добавок, полученных из отходов строительной промышленности, в составе бетонной смеси. В рамках диссертационной работы были проведены исследования, направленные на изучение влияния этих добавок на механические свойства бетонов. В качестве модификаторов бетонной смеси использовали дисперсные порошки, полученные из керамических строительных отходов (кирпичный бой).

Порошковые материалы классифицируют по размерам частиц, определяемым условным диаметром d . Классификация включает [321]:

- нанодисперсные порошки с диаметром частиц $(d) < 0,1$ мкм;
- ультрадисперсные порошки с диаметром частиц $(d) = 0,1–0,5$ мкм;
- тонкодисперсные порошки с диаметром частиц $(d) = 0,5–10$ мкм;
- мелкодисперсные порошки с диаметром частиц $(d) = 10–40$ мкм;
- среднedisперсные порошки с диаметром частиц $(d) = 40–150$ мкм;
- крупнодисперсные порошки с диаметром частиц $(d) = 150–500$ мкм.

Эта классификация условна и различается в зависимости от области применения порошковых материалов. Тем не менее, она позволяет систематизировать материалы в зависимости от их размеров, что важно для оптимизации процессов их переработки и применения в промышленности.

3.2. Получение дисперсных порошков

Дисперсные порошки представляют собой гетерогенные системы, которые могут быть получены двумя основными методами: дисперсионным и конденсационным. Дисперсионный метод заключается в измельчении крупных частиц, тогда как конденсационный метод предполагает образование

агрегатов из молекул вещества под воздействием остаточных молекулярных сил.

Способы получения дисперсных порошков можно классифицировать на две основные категории: физико-механические и физико-химические [322].

Физико-механические способы включают следующие подходы [323 - 325]:

- диспергирование расплавов с использованием струи жидкости или газа;
- механическое диспергирование, например, метод распыления;
- измельчение в твердом состоянии, включая избирательное, мокрое, сухое и взрывное.

Физико-химические способы получения ДП и УДП характеризуются большим разнообразием и включают процессы [326; 322; 327]:

- восстановления;
- осаждения;
- испарения;
- диффузионного насыщения;
- химического взаимодействия (в частности, взрыва).

При выборе способа получения дисперсных порошков руководствуются рядом взаимозависимых факторов, включающих:

- свойства исходного материала,
- требуемые характеристики конечного продукта,
- производительность и экономическую целесообразность.

Целью данной части исследования являлось получение ДП из строительных отходов с использованием метода механического измельчения, как наиболее доступного технологически и недорогого по затратам. Однако, метод измельчения представляет собой энергозатратную операцию и оказывает значительное влияние на физико-химические и технологические свойства готового продукта.

Как правило, в ходе измельчения контролируются такие параметры, как форма и состояние поверхности частиц, уровень их деформационного упрочнения, гранулометрический состав, а также загрязненность продуктами взаимодействия порошка с атмосферой воздуха. Кроме того, важным представляется переход в готовый продукт части материалов реактора мельницы и ее измельчителей [322; 326]. При этом ключевую роль в технологии играет выбор технологических параметров измельчения, обеспечивающих получение ДП фракции необходимых размеров.

В качестве строительных отходов использовали бой кирпичей, химический состав которых представлен в главе 2 диссертации. Основные компоненты большинства строительных кирпичей — диоксид кремния и глинозем, что позволяет отнести их к пуццолановым материалам, которые при взаимодействии с водой в процессе гидратации обладают связующими свойствами и способствуют формированию геля C-S-H [328; 329]. Использование порошков пуццолановых материалов в производстве бетона способствует повышению его прочностных характеристик [330].

Измельчение строительных отходов проводили в мельницах двух типов (шарового и планетарного) при различных условиях загрузки и технологических параметрах работы измельчительных агрегатов.

В главе 2 приведены технические характеристики шаровой мельницы типа WiseMix BML-2, в которой производили измельчение описанных выше материалов до дисперсных размеров.

Полученный в результате измельчения материал разделяли на стандартном наборе сит с выделением фракции с размерами $-0,026+0$ мм, которую использовали в качестве модификатора при составлении рабочей бетонной смеси.

3.3. Исследование гранулометрического и химического составов дисперсных порошков

Основными задачами проводимого исследования являлись изучение:

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

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.

С целью эффективного управления процессом измельчения было изучено влияние параметров и степени измельчения на гранулометрический и химический составы полученных дисперсных порошков. В связи с этим был проведен ряд экспериментов, в которых интервалы циклов помола составляли от 20 до 60 минут. При этом скорость вращения мельницы варьировали от 300 до 600 оборотов в минуту, а соотношение массы мелющих тел к массе измельчаемого материала от 4,26 до 11,9. Результаты анализа гранулометрического и химического составов различных фракций измельченного продукта представлены ниже.

Образец 1. В рамках исследования были проведены эксперименты по измельчению образца облицовочного кирпича 0,7 NF (далее – образец №1). Зависимость изменения гранулометрического и химического состава полученных дисперсных порошков (ДП образца №1) от параметров измельчения представлена на рисунках 3.1– 3.4 и в таблицах 3.1 – 3.2.

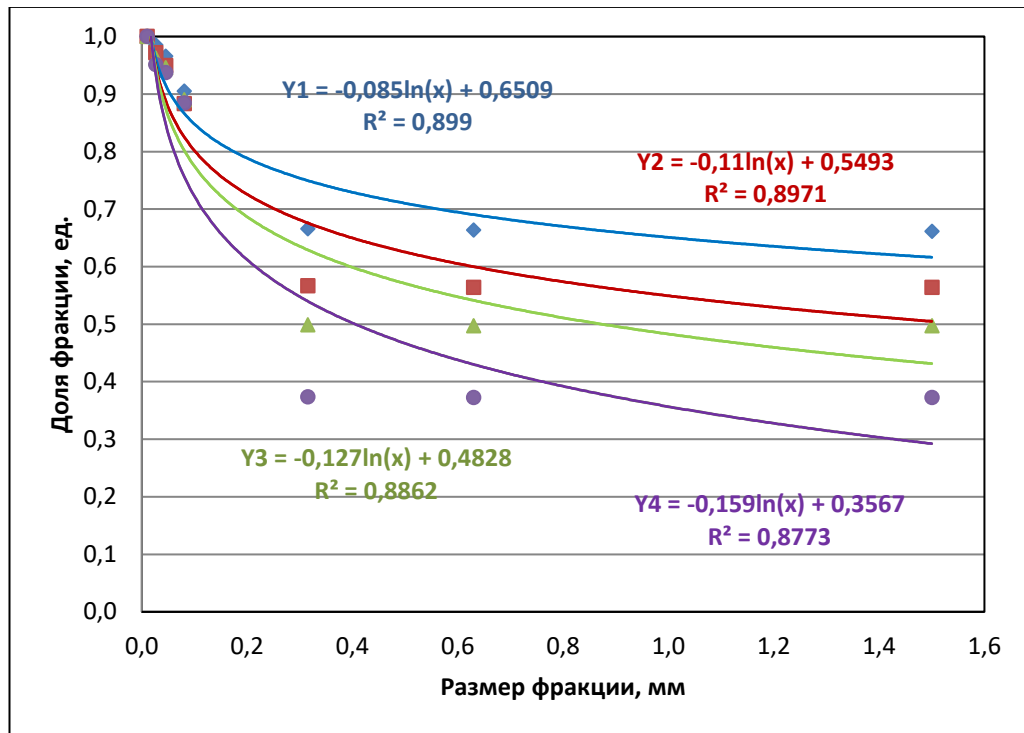


Рисунок 3.1 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №1 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 600 об/мин, 360 г, 60 шаров

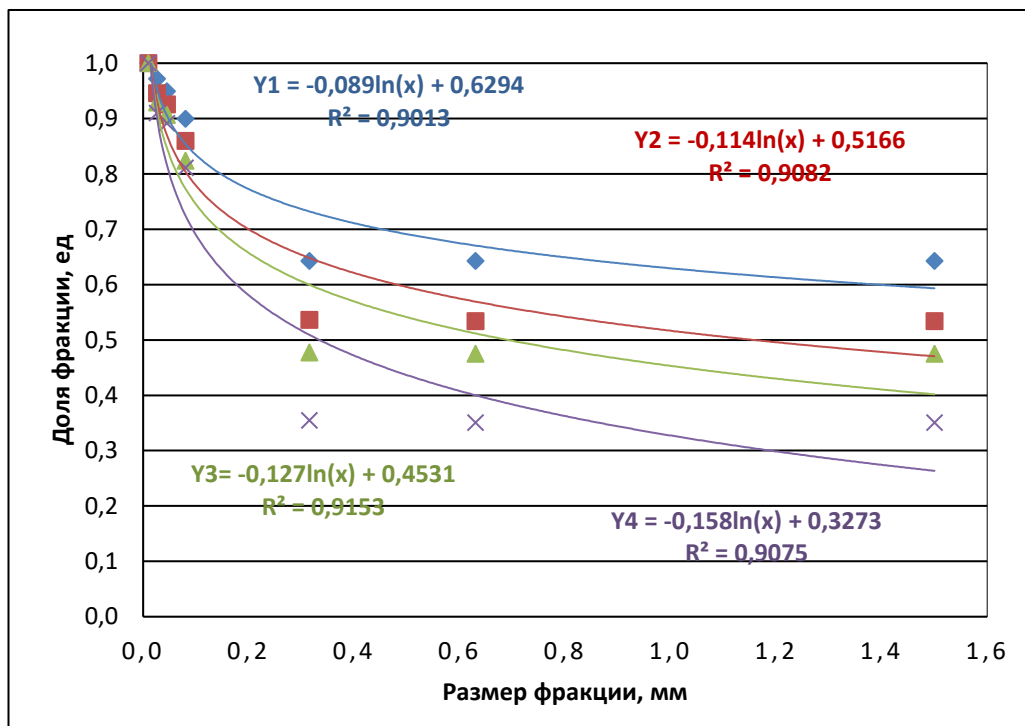


Рисунок 3.2 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №1 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 600 об/мин, 250 г, 80 шаров

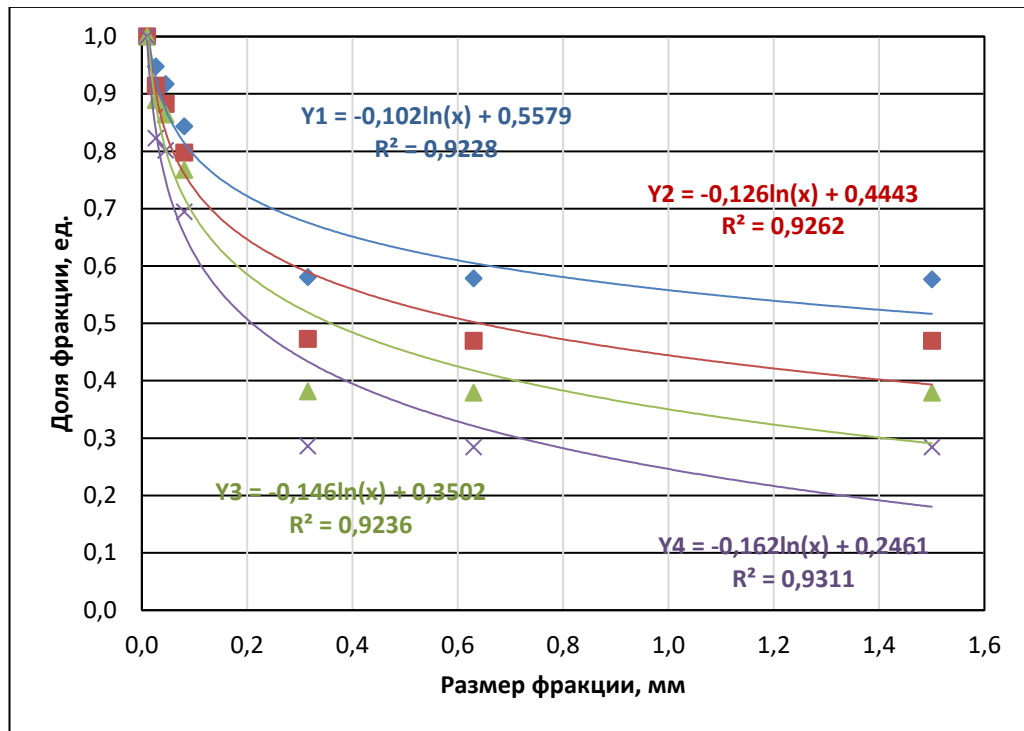


Рисунок 3.3 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №1 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 450 об/мин, 350 г, 60 шаров

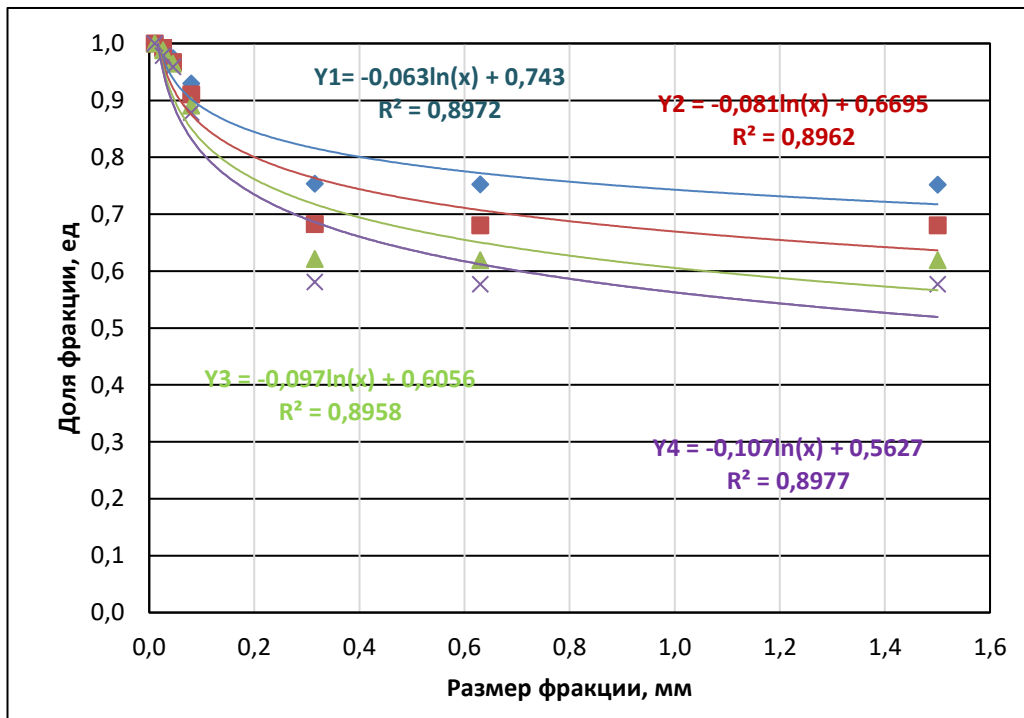


Рисунок 3.4 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №1 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 300 об/мин, 350 г, 40 шаров

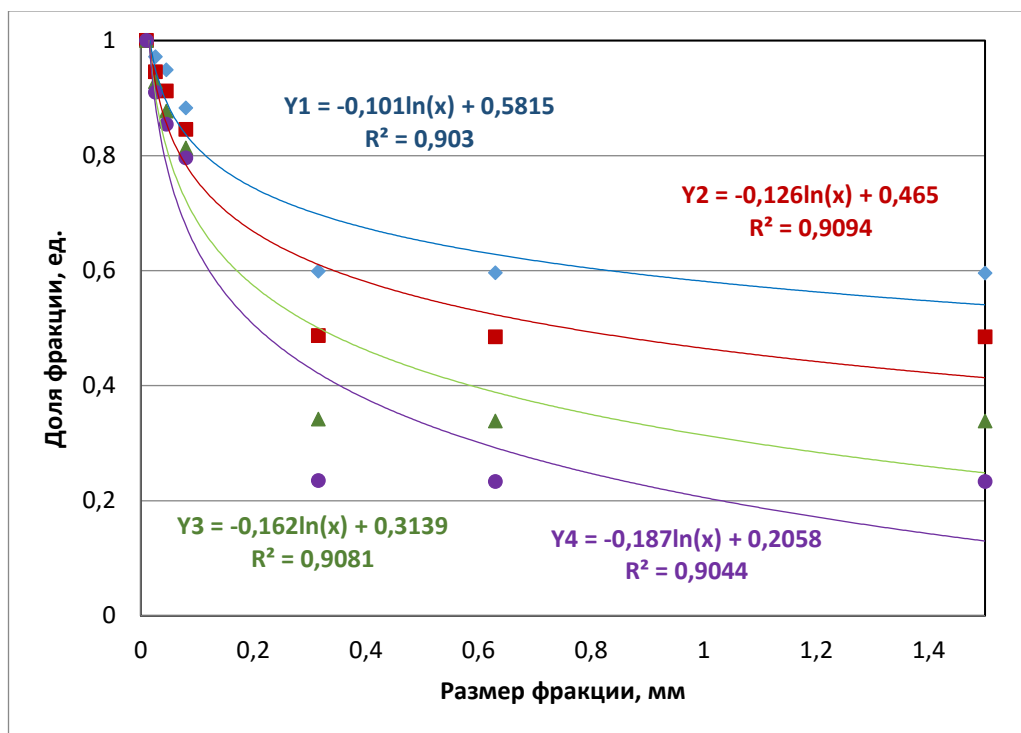


Рисунок 3.5 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №1 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 600 об/мин, 360 г, 80 шаров

Таблица 3.1 – Химический состав ДП образца №1 при различных условиях измельчения

Размер фракции, мм	Содержание во фракции, %					
	Al	Si	Mn	Fe	K	Пр.
Время измельчения – 20 минут						
-0,315+0,08	12,24	54,20	6,49	18,60	5,36	3,11
-0,08+0,045	4,58	57,30	7,54	21,28	5,88	3,42
-0,045+0,026	7,20	55,84	7,21	20,64	5,73	3,38
-0,026+0	0,003	57,38	8,21	22,44	6,03	5,937
Время измельчения – 30 минут						
-0,315+0,08	9,75	56,83	18,82	6,50	5,23	2,87
-0,08+0,045	9,00	62,14	16,65	0,308	7,66	4,242
-0,045+0,026	8,41	61,56	17,38	5,43	6,84	0,38
-0,026+0	7,69	62,62	17,88	6,01	5,70	0,10
Время измельчения – 45 минут						
-0,315+0,08	12,27	53,30	19,71	6,55	5,21	2,96
-0,08+0,045	3,04	57,57	22,49	7,64	5,90	3,36
-0,045+0,026	7,79	56,82	20,37	6,54	5,34	3,14
-0,026+0	7,24	54,24	22,78	6,70	5,62	3,42
Время измельчения – 60 минут						
-0,315+0,08	8,22	58,03	20,31	4,91	5,76	2,77
-0,08+0,045	11,94	61,10	15,87	3,96	4,67	2,46
-0,045+0,026	11,53	60,60	16,21	5,13	5,89	0,64
-0,026+0	11,28	58,80	18,01	4,24	4,77	2,9

Таблица 3.2 – Изменение гранулометрического состава ДП образца №1 при различных условиях измельчения

Время измельчения, мин.	20	30	45	60
Размер фракции, мм	Доля фракции, %			
Условия измельчения: 600 об/мин, 360 г, 60 шаров				
+1,5	66,11	56,39	49,72	37,22
-1,5+0,63	0,25	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,22	0,25	0,13	0,13
-0,315+0,08	23,89	31,67	39,17	51,11
-0,08+0,045	6,11	6,67	5,56	5,28
-0,045+0,026	1,94	2,22	1,67	1,39
-0,026+0	1,47	2,81	3,76	4,87
Условия измельчения: 450 об/мин, 350 г, 60 шаров				
+1,5	66,09	54,94	48,86	36,09
-1,5+0,63	0,00	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,03	0,23	0,26	0,40
-0,315+0,08	26,43	33,26	35,60	46,91
-0,08+0,045	5,11	6,77	8,51	8,26
0,045+0,026	2,29	2,06	2,34	1,94
-0,026+0	0,06	2,74	4,43	6,40
Условия измельчения: 600 об/мин, 250 г, 80 шаров				
+1,5	57,64	46,92	37,92	28,41
-1,5+0,63	0,16	0	0	0,00
-0,63+0,315	0,24	0,36	0,18	0,20
-0,315+0,08	26,28	32,48	38,64	40,82
-0,08+0,045	7,4	8,48	9,66	10,74
0,045+0,026	3,04	3,16	2,48	2,12
-0,026+0	5,24	8,6	11,12	17,72
Условия измельчения: 300 об/мин, 350 г, 40 шаров				
+1,5	75,15	68,06	61,89	57,71
-1,5+0,63	0,06	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,11	0,23	0,26	0,37
-0,315+0,08	17,63	22,77	26,91	29,74
-0,08+0,045	4,43	5,66	7,40	8,06
0,045+0,026	1,90	2,49	2,34	1,94
-0,026+0	0,71	0,80	1,20	2,17
Условия измельчения: 600 об/мин, 360 г, 80 шаров				
+1,5	59,56	48,47	33,83	23,34
-1,5+0,63	0,06	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,31	0,25	0,33	0,13
-0,315+0,08	28,33	35,83	47,17	56,14
-0,08+0,045	6,67	6,67	6,39	5,83
0,045+0,026	2,25	3,33	5,11	5,56
-0,026+0	2,83	5,44	7,17	9,00

Образец 2. Для исследования был выбран шамотный кирпич ШБ-5 (далее – образец №2). Гранулометрический и химический состав ДП образца №2 представлен в таблицах 3.3 – 3.4 и на рисунках 3.6 – 3.12.

Таблица 3.3 – Химический состав ДП образца №2 при различных условиях измельчения

Размер фракции, мм	Содержание во фракции, %			
	Al	Si	K	Pr.
Время измельчения – 20 минут				
-0,315+0,08	27,32	50,19	14,36	8,13
-0,08+0,045	31,84	47,84	12,73	7,59
-0,045+0,026	23,19	51,67	15,91	9,23
-0,026+0	16,74	55	18,37	9,89
Время измельчения – 30 минут				
-0,315+0,08	25,54	51,07	3,70	19,69
-0,08+0,045	5,48	63,74	8,11	22,67
-0,045+0,026	27,32	50,19	3,35	19,14
-0,026+0	25,65	51,50	3,55	19,3
Время измельчения – 45 минут				
-0,315+0,08	25,65	51,47	3,94	18,94
-0,08+0,045	25,02	52,60	3,56	18,82
-0,045+0,026	23,75	51,17	3,72	21,36
-0,026+0	20,88	51,62	3,97	23,53
Время измельчения – 60 минут				
-0,315+0,08	28,56	48,36	3,69	19,39
-0,08+0,045	34,11	48,10	3,07	14,72
-0,045+0,026	24,69	53,25	3,78	18,28
-0,026+0	23,81	54,06	3,69	18,44

Таблица 3.4 – Изменение гранулометрического состава ДП образца №2 при различных условиях измельчения

Время измельчения, мин.	20	30	45	60
Размер фракции, мм	Доля фракции, %			
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 60 шаров				
+1,5	70,00	39,74	25,53	17,63
-1,5+0,63	0,53	0,24	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,53	0,53	0,21	0,18
-0,315+0,08	17,89	41,05	55,53	57,63
-0,08+0,045	5,53	7,37	5,26	8,95
-0,045+0,026	2,37	2,89	2,37	2,89
-0,026+0	3,16	8,18	11,11	12,71
Условия измельчения: 300 об/мин, 500 г, 80 шаров				
+1,5	40,20	32,66	26,40	22,86
-1,5+0,63	4,64	3,20	1,78	1,14
-0,63+0,315	4,46	2,14	0,70	0,38

-0,315+0,08	42,82	54,78	60,52	67,60
-0,08+0,045	6,68	5,84	8,68	5,06
0,045+0,026	0,52	0,56	0,66	0,74
-0,026+0	0,68	0,82	1,26	2,22
Условия измельчения: 300 об/мин, 700 г, 80 шаров				
+1,5	44,30	37,54	30,40	25,93
-1,5+0,63	5,89	4,59	3,10	2,09
-0,63+0,315	6,19	4,66	2,59	1,20
-0,315+0,08	38,01	46,46	54,60	56,10
-0,08+0,045	4,91	5,86	8,14	11,73
0,045+0,026	0,53	0,49	0,49	1,37
-0,026+0	0,17	0,41	0,69	1,59
Условия измельчения: 300 об/мин, 360 г, 80 шаров				
+1,5	30,72	18,97	11,33	5,64
-1,5+0,63	5,03	3,19	1,75	0,89
-0,63+0,315	4,64	1,92	0,58	0,28
-0,315+0,08	43,53	57,50	65,28	77,31
-0,08+0,045	14,47	14,86	16,75	10,75
0,045+0,026	1,22	1,22	1,19	0,47
-0,026+0	0,39	2,33	3,11	4,67
Условия измельчения: 300 об/мин, 350 г, 40 шаров				
+1,5	39,57	30,23	22,74	18,23
-1,5+0,63	6,97	6,03	3,51	2,17
-0,63+0,315	8,69	7,80	4,69	1,94
-0,315+0,08	29,3	38,63	47,17	65,14
-0,08+0,045	12,86	15,51	19,60	10,71
0,045+0,026	1,89	0,97	1,40	0,34
-0,026+0	0,75	0,81	0,86	1,42
Условия измельчения: 450 об/мин, 350 г, 80 шаров				
+1,5	41,00	30,60	24,80	17,89
-1,5+0,63	4,00	2,40	1,57	0,63
-0,63+0,315	3,11	0,94	0,34	0,34
-0,315+0,08	40,69	60,97	64,26	64,57
-0,08+0,045	9,57	4,17	6,77	13,20
0,045+0,026	1,57	0,23	1,17	1,34
-0,026+0	0,06	0,69	1,09	2,03
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 80 шаров				
+1,5	60,26	43,34	31,24	24,63
-1,5+0,63	0,32	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,47	0,34	0,29	0,13
-0,315+0,08	27,11	37,79	47,05	51,84
-0,08+0,045	4,47	5,37	6,11	6,03
-0,045+0,026	2,68	3,18	2,61	3,05
-0,026+0	4,68	9,97	12,71	14,32

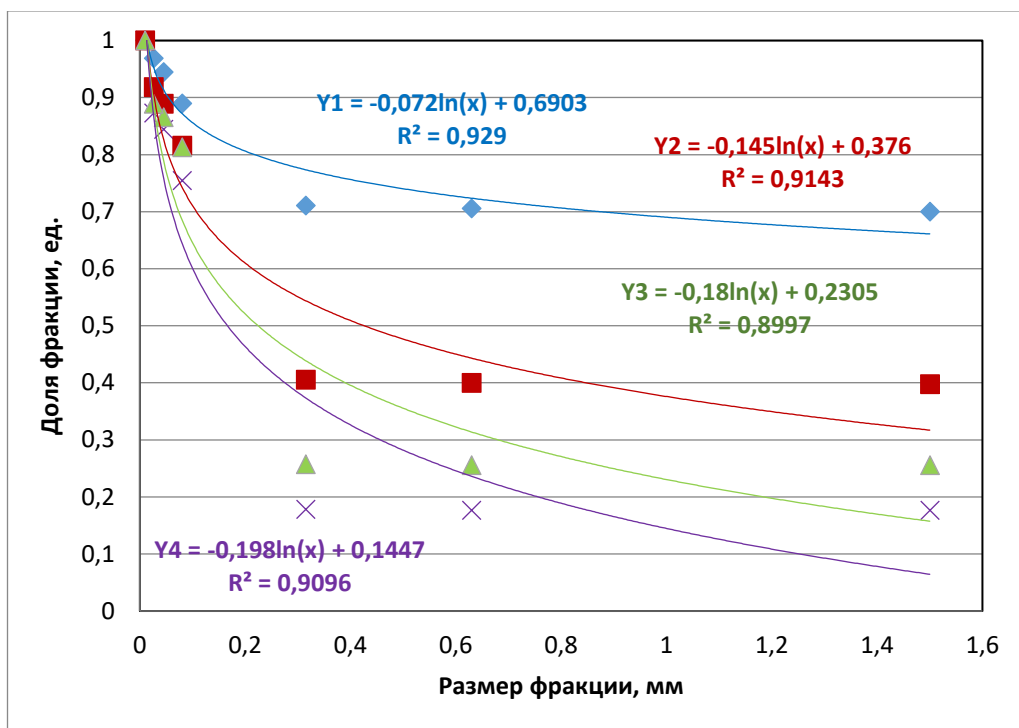


Рисунок 3.6 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 60 шаров

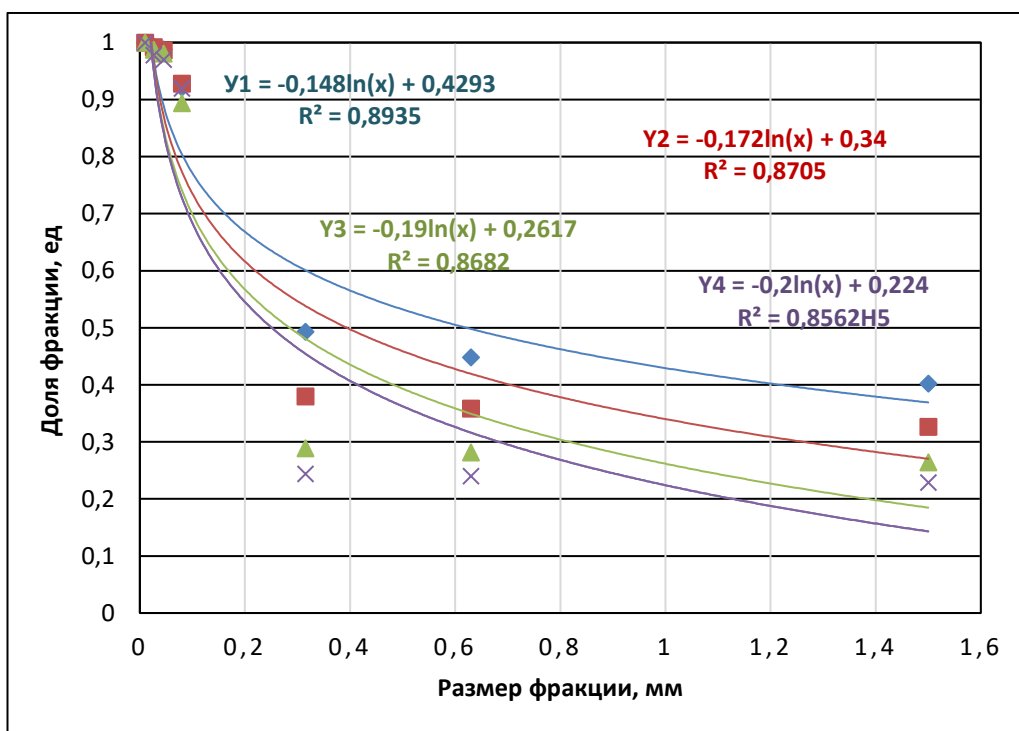


Рисунок 3.7 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин (Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60). Условия измельчения: 300 об/мин, 500 г, 80 шаров

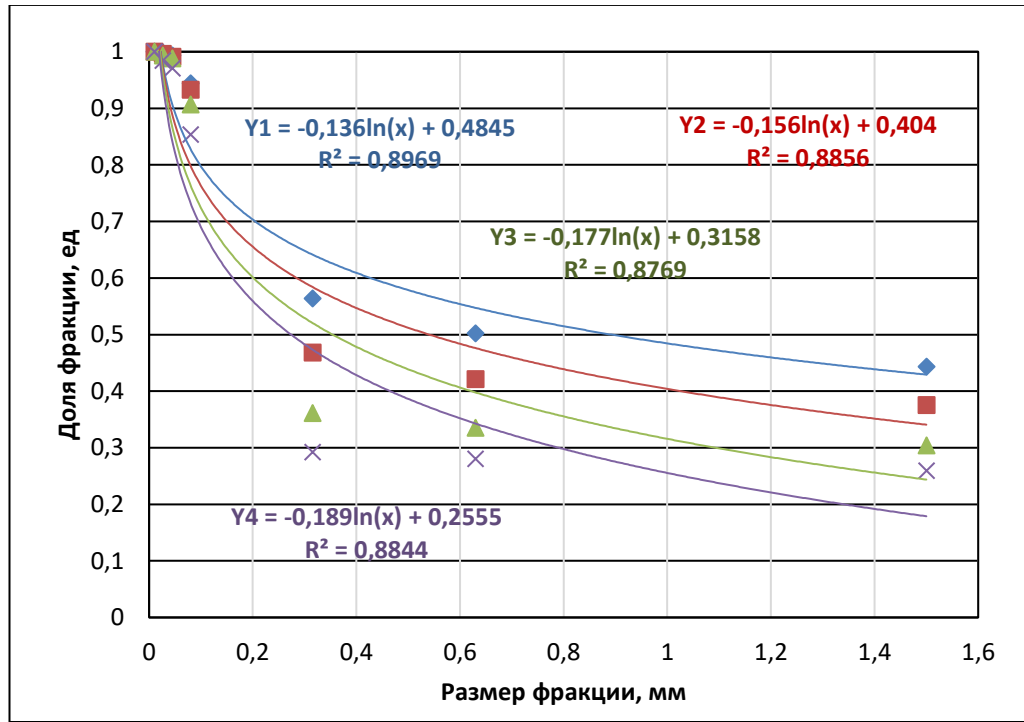


Рисунок 3.8 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 300 об/мин, 700 г, 80 шаров

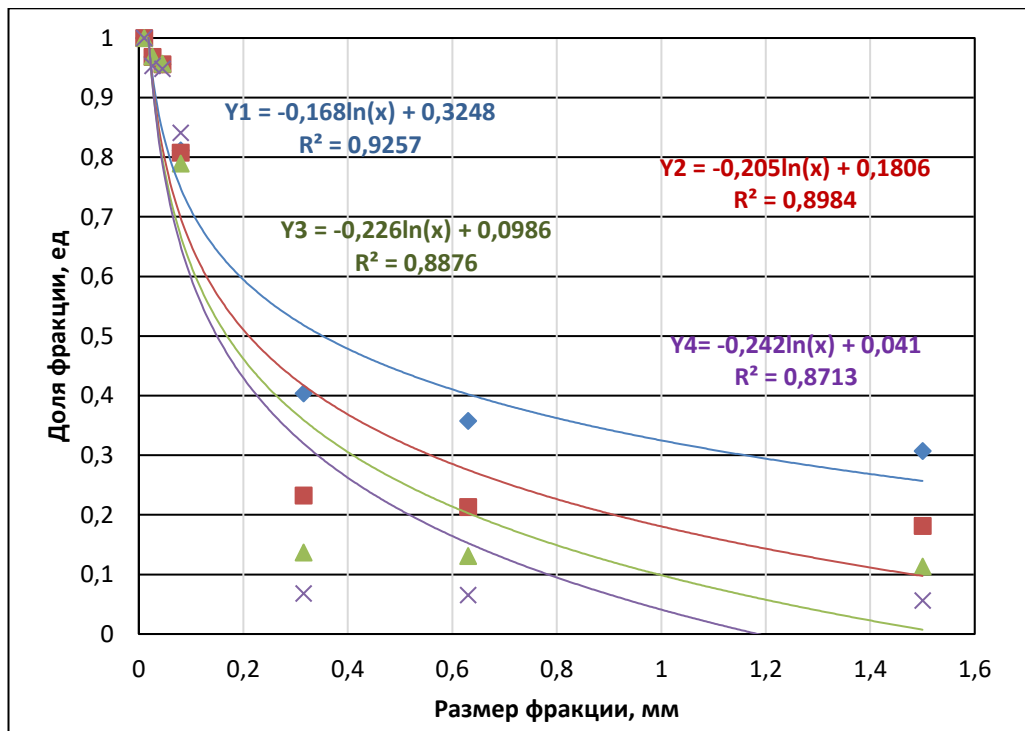


Рисунок 3.9 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 300 об/мин, 360 г, 80 шаров

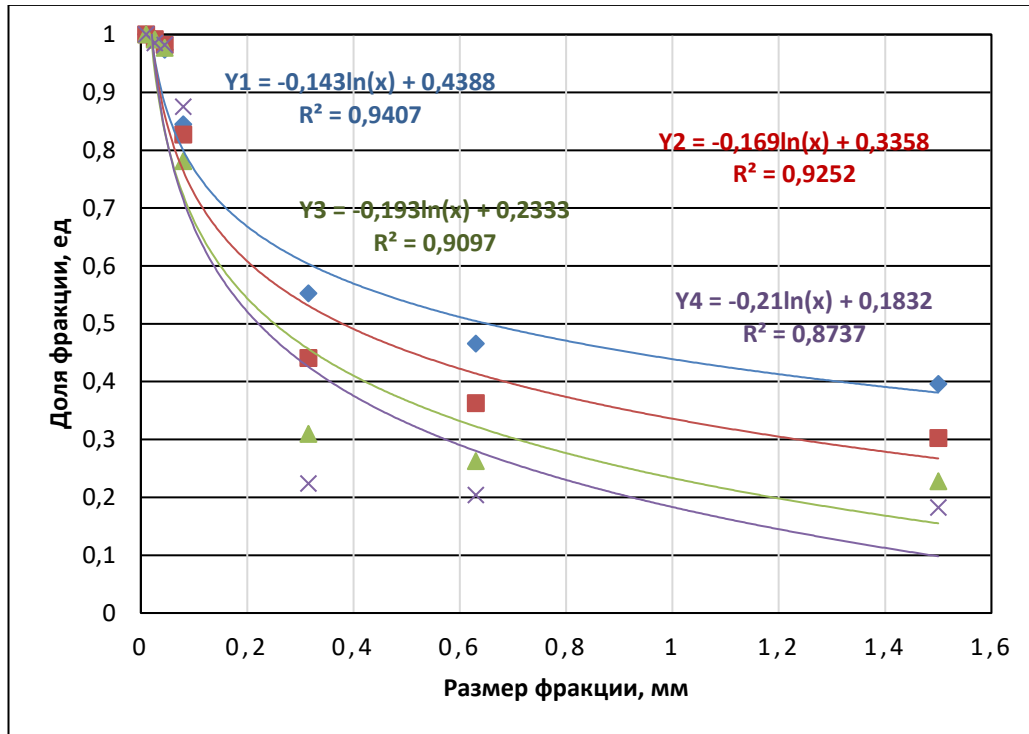


Рисунок 3.10 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 300 об/мин, 350 г, 40 шаров

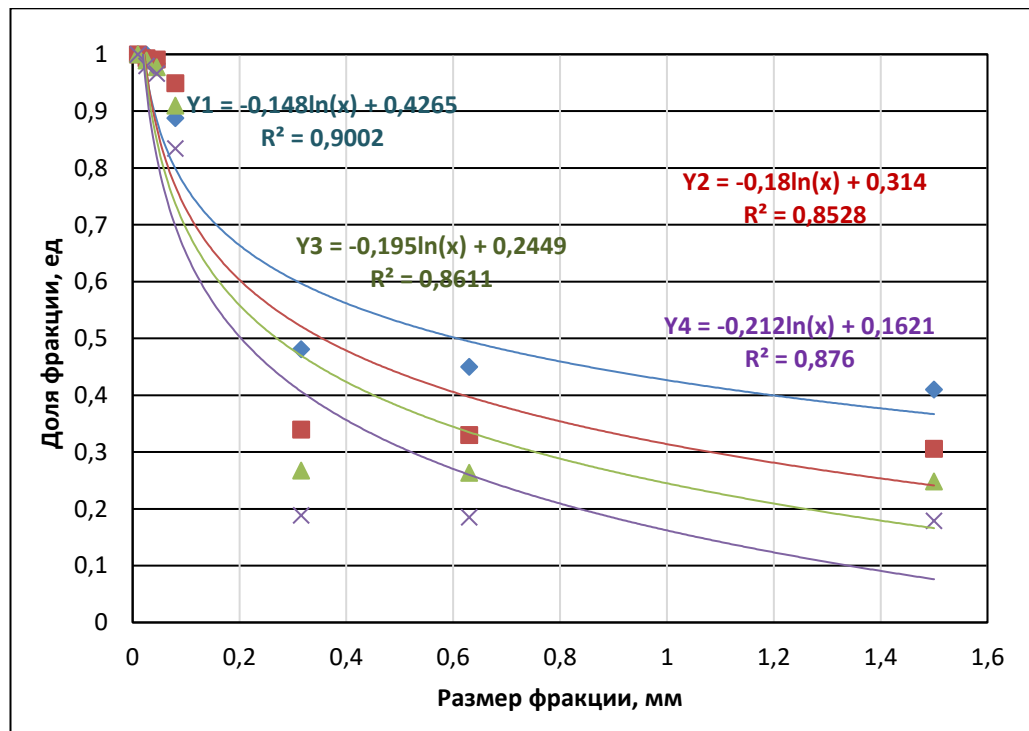


Рисунок 3.11 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 450 об/мин, 350 г, 80 шаров

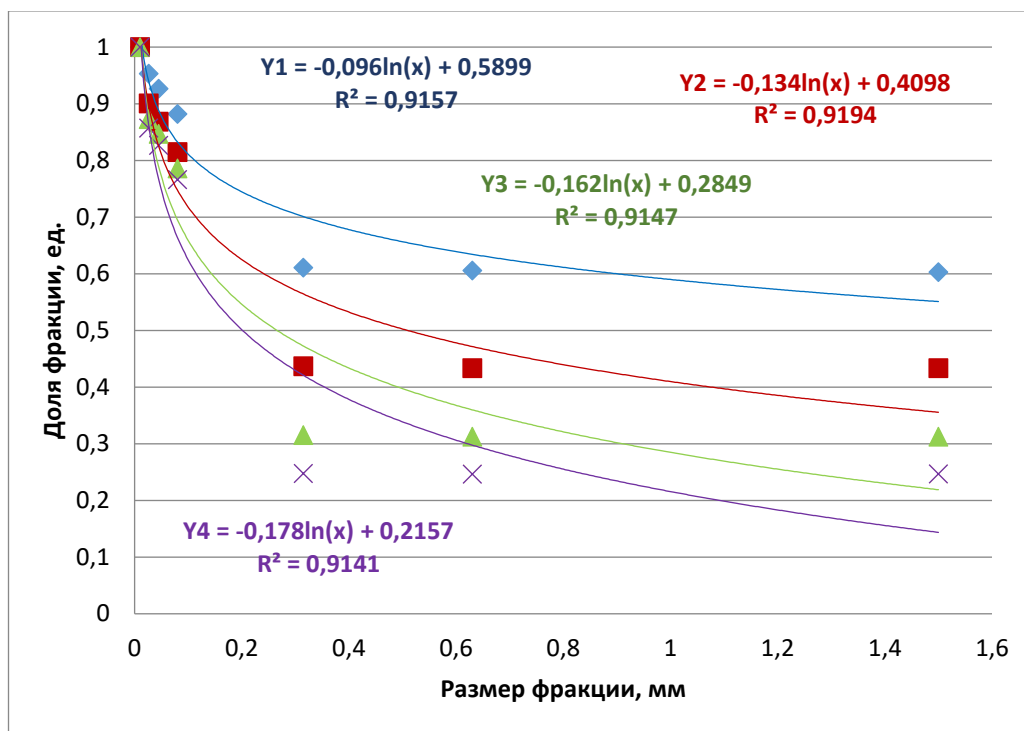


Рисунок 3.12 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №2 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 80 шаров

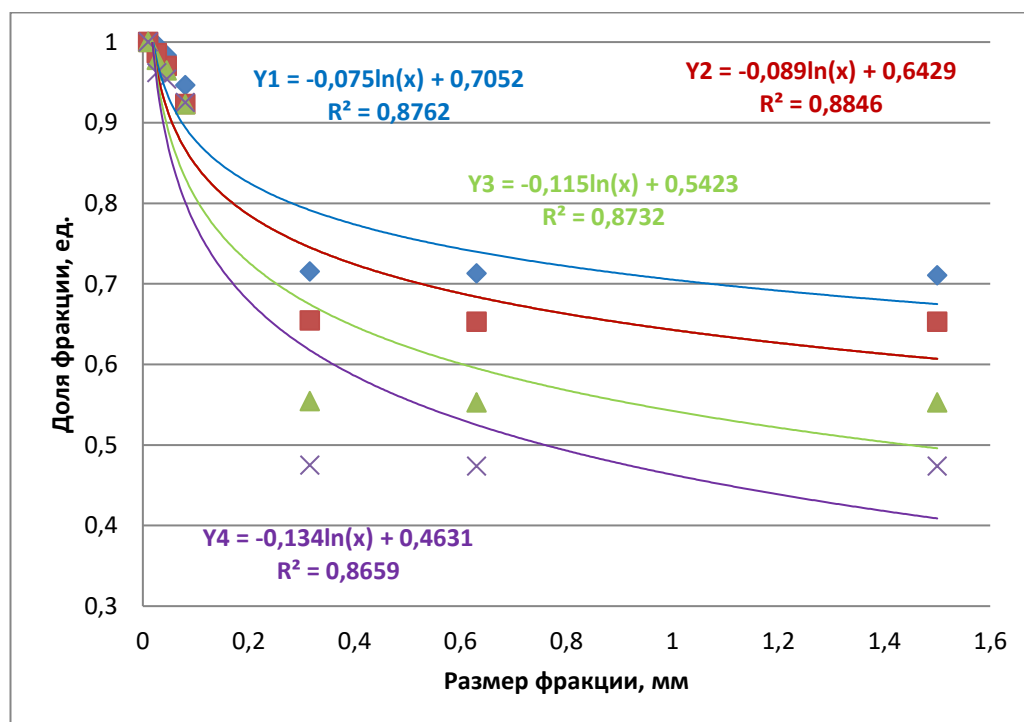
Образец 3. В качестве образца для измельчения использовали облицовочный кирпич М 200 1NF (далее – образец №3). Зависимость изменения гранулометрического и химического состава полученных дисперсных порошков (ДП образца №3) от параметров измельчения представлена в таблицах 3.5 – 3.6 и на рисунках 3.12– 3.15.

Таблица 3.5 – Изменение гранулометрического состава ДП образца №3 при различных условиях измельчения

Время измельчения, мин.	20	30	45	60
Размер фракции, мм	Масса полученного материала, г			
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 60 шаров				
+1,5	71,05	65,26	55,26	47,37
-1,5+0,63	0,24	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,21	0,18	0,16	0,13
-0,315+0,08	23,16	26,84	36,84	45,00
-0,08+0,045	3,68	4,74	4,21	2,89
-0,045+0,026	1,32	1,58	1,32	0,79
-0,026+0	0,34	1,39	2,21	3,82
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 80 шаров				
+1,5	63,63	51,97	40,74	31,05
-1,5+0,63	0,29	0,00	0,00	0,00
-0,63+0,315	0,45	0,42	0,24	0,21
-0,315+0,08	27,37	36,53	45,26	52,89
-0,08+0,045	4,61	5,21	5,37	5,26
0,045+0,026	2,74	3,21	3,84	3,63
-0,026+0	0,92	2,66	4,55	6,95
Условия измельчения: 300 об/мин, 500 г, 80 шаров				
+1,5	80,24	75,30	66,46	51,56
-1,5+0,63	0,02	0,02	0,02	0,02
-0,63+0,315	0,02	0,02	0,02	0,02
-0,315+0,08	15,38	19,68	26,82	38,92
-0,08+0,045	2,24	2,14	2,26	4,00
0,045+0,026	1,72	2,00	2,60	2,58
-0,026+0	0,38	0,84	1,82	2,90
Условия измельчения: 300 об/мин, 500 г, 60 шаров				
+1,5	84,02	78,48	69,76	57,88
-1,5+0,63	0,00	0,00	0,02	0,02
-0,63+0,315	0,02	0,02	0,02	0,02
-0,315+0,08	12,74	17,62	25,00	36,14
-0,08+0,045	1,76	1,92	2,02	2,04
0,045+0,026	1,24	1,42	1,92	2,00
-0,026+0	0,22	0,54	1,26	1,90

Таблица 3.6 – Химический состав ДП образца №3 при различных условиях измельчения

Размер фракции, мм	Содержание во фракции, %					
	Al	Si	Ca	Fe	K	Пр.
Время измельчения – 20 минут						
-0,315+0,08	5,73	62,62	2,31	18,16	8,00	0,05
-0,08+0,045	11,47	61,42	1,08	15,22	7,31	0,08
-0,045+0,026	4,46	63,10	2,27	18,44	8,25	0,10
-0,026+0	4,40	63,04	2,11	16,14	7,44	0,93
Время измельчения – 30 минут						
-0,315+0,08	4,27	63,00	2,26	18,79	8,72	0,09
-0,08+0,045	5,14	62,98	2,14	17,12	8,24	0,14
-0,045+0,026	6,93	63,56	2,02	17,01	7,57	2,53
-0,026+0	7,31	63,86	1,94	16,31	8,02	2,46
Время измельчения – 45 минут						
-0,315+0,08	4,29	62,56	2,25	19,24	8,40	0,39
-0,08+0,045	7,03	61,13	2,13	18,00	8,26	0,09
-0,045+0,026	12,63	61,32	1,79	14,84	6,18	0,11
-0,026+0	10,41	61,02	1,71	16,14	7,20	0,10
Время измельчения – 60 минут						
-0,315+0,08	25,04	54,11	1,43	10,42	5,63	0,60
-0,08+0,045	27,34	54,00	1,34	9,61	5,14	0,11
-0,045+0,026	24,22	57,49	1,11	9,18	5,13	0,18
-0,026+0	18,42	62,13	1,85	8,50	5,28	0,08

Рисунок 3.13 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №3 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.

Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 60 шаров

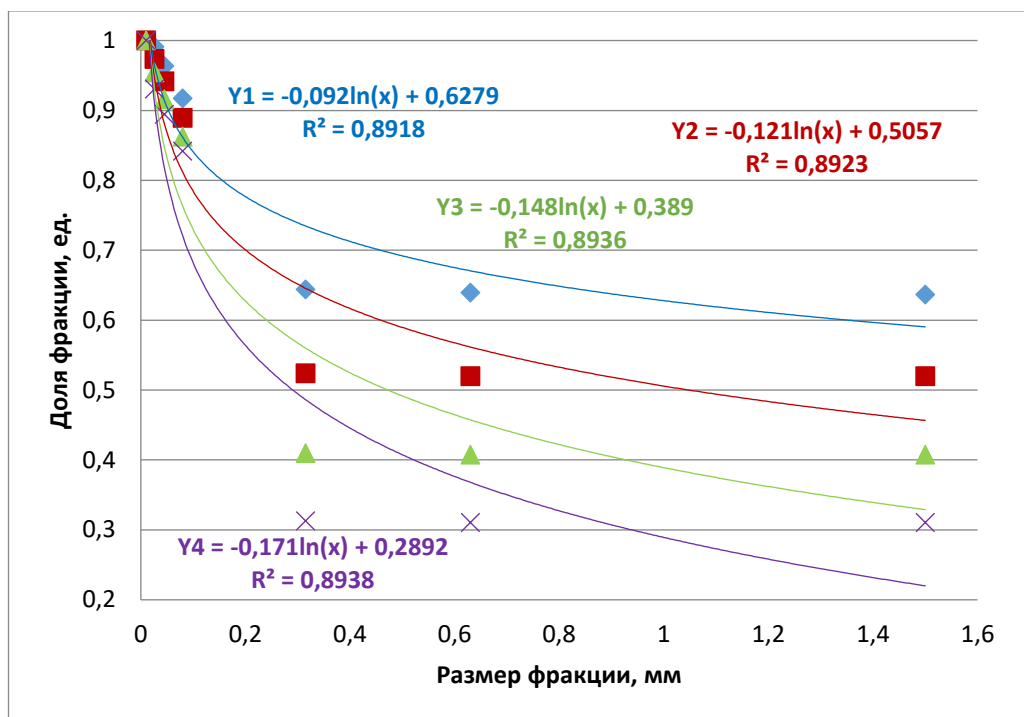


Рисунок 3.14 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №3 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 600 об/мин, 380 г, 80 шаров

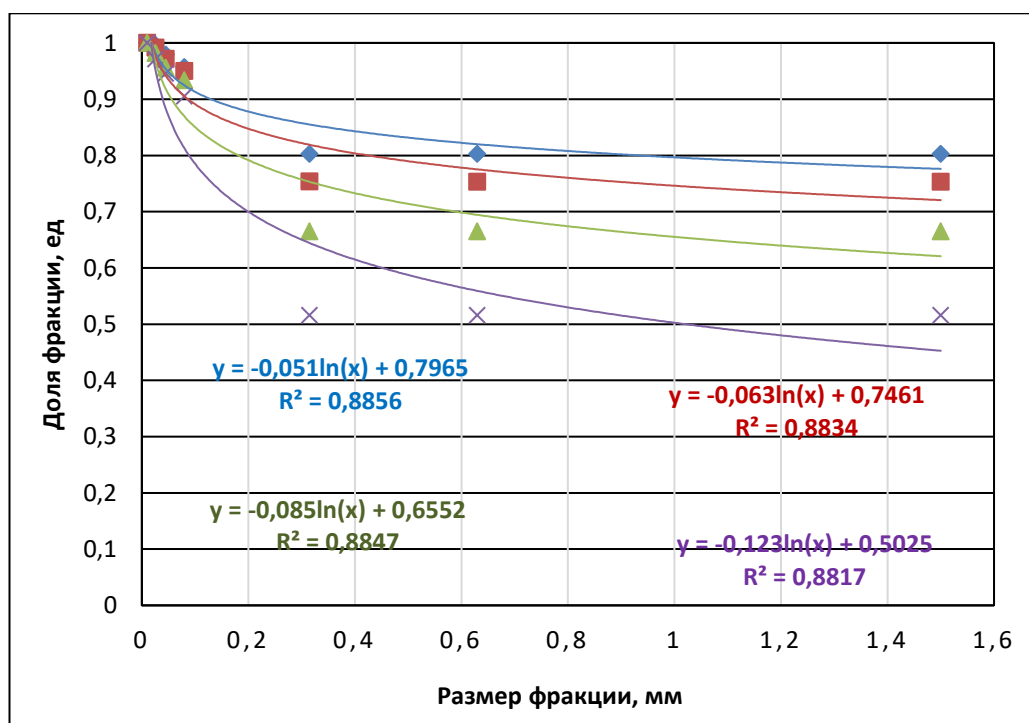


Рисунок 3.15 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №3 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 300 об/мин, 500 г, 80 шаров

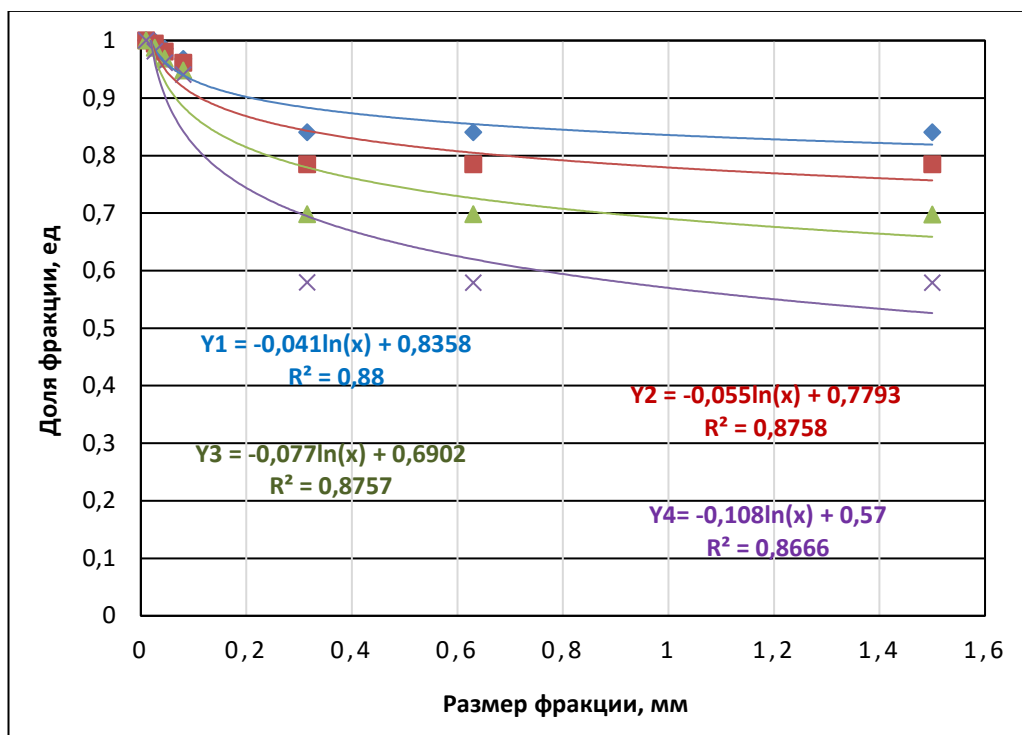


Рисунок 3.16 – Зависимость изменения гранулометрического состава ДП образца №3 от длительности измельчения, мин: Y₁, Y₂, Y₃ и Y₄ – 20, 30, 45 и 60, соответственно.
Условия измельчения: 300 об/мин, 500 г, 60 шаров

Исследование гранулометрических свойств измельчённых материалов (строительный кирпич различных марок) выявило зависимость эффективности дезинтеграции от интенсивности, продолжительности процесса и степени загрузки помольной камеры мелющими телами. Гранулометрические кривые демонстрируют общие закономерности процесса измельчения строительных материалов, согласующиеся с теоретическими представлениями о механизме измельчения материалов [331].

При сравнительном анализе эффективности измельчения различных типов строительных материалов в шаровой мельнице установлено, что степень измельчения и фракционный состав получаемых порошков зависят от химического и фазового составов исходных образцов. Выявлено значительное различие в химическом составе различных фракций одного и того же диспергируемого образца, что обусловлено различием прочностных характеристик компонентов измельчаемой смеси.

3.4. Исследование кинетики измельчения дисперсных порошков

С целью подбора оптимальных условий эксплуатации мельницы провели исследования кинетики процесса измельчения представленных материалов. Эффективность измельчения оценивали по выходу фракции с размерами $-0,026+0$ мм. Полученные в результате измельчения образцов материала экспериментальные данные обработали, используя уравнение кинетики [331; 332]:

$$Y = k \ln X + B, \quad (3.1)$$

где Y – доля выхода фракции $-0,026+0$ мм;

k – константа скорости процесса измельчения материала до фракции $-0,026+0$ мм,

B – постоянная логарифмирования.

В таблице 3.7 и на рисунках 3.17–3.19 представлены результаты сравнительного анализа кинетики измельчения кирпичных отходов до размера фракции $-0,026+0$ мм, указывающие на линейный характер зависимости скорости процесса измельчения от времени. ДП №1, ДП №2, ДП №3 – ДП соответствующих образцов кирпичного боя фракцией $-0,026+0$ мм

Таблица 3.7 – Сводная таблица кинетики измельчения образцов кирпичного боя

Тип материала	Скорость вращения мельницы, об./мин.	Время измельчения, мин.	Отношение масс загрузки и мелющих тел ($M_{ш}/M_3$)	Уравнение кинетики	k , 1/мин	B	R^2
ДП №1	600	20	6,21	$y = -0,085 \ln(x) + 0,6509$	-0,085	0,6509	0,899
ДП №1	600	30	6,21	$y = -0,11 \ln(x) + 0,5493$	-0,11	0,5493	0,8971
ДП №1	600	45	6,21	$y = -0,127 \ln(x) + 0,4828$	-0,127	0,4828	0,8862
ДП №1	600	60	6,21	$y = -0,159 \ln(x) + 0,3567$	-0,159	0,3567	0,8773
ДП №1	600	20	11,90	$y = -0,102 \ln(x) + 0,5579$	-0,102	0,5579	0,9228
ДП №1	600	30	11,90	$y = -0,126 \ln(x) + 0,4443$	-0,126	0,4443	0,9262
ДП №1	600	45	11,90	$y = -0,146 \ln(x) + 0,3502$	-0,146	0,3502	0,9236
ДП №1	600	60	11,90	$y = -0,162 \ln(x) + 0,2461$	-0,162	0,2461	0,9311
ДП №1	600	20	8,26	$y = -0,089 \ln(x) + 0,6294$	-0,089	0,6294	0,9013
ДП №1	600	30	8,26	$y = -0,114 \ln(x) + 0,5166$	-0,114	0,5166	0,9082
ДП №1	600	45	8,26	$y = -0,127 \ln(x) + 0,4531$	-0,127	0,4531	0,9153
ДП №1	600	60	8,26	$y = -0,158 \ln(x) + 0,3273$	-0,158	0,3273	0,9075
ДП №1	300	20	4,26	$y = -0,063 \ln(x) + 0,743$	-0,063	0,743	0,8972

ДП №1	300	30	4,26	$y = -0,081\ln(x) + 0,6695$	-0,081	0,6695	0,8962
ДП №1	300	45	4,26	$y = -0,097\ln(x) + 0,6056$	-0,097	0,6056	0,8958
ДП №1	300	60	4,26	$y = -0,107\ln(x) + 0,5627$	-0,107	0,5627	0,8977
ДП №1	600	20	7,87	$y = -0,101\ln(x) + 0,5815$	-0,101	0,5815	0,903
ДП №1	600	30	7,87	$y = -0,126\ln(x) + 0,465$	-0,126	0,465	0,9094
ДП №1	600	45	7,87	$y = -0,162\ln(x) + 0,3139$	-0,162	0,3139	0,9081
ДП №1	600	60	7,87	$y = -0,187\ln(x) + 0,2058$	-0,187	0,2058	0,9044
ДП №2	600	20	5,88	$y = -0,072\ln(x) + 0,6903$	-0,072	0,6903	0,929
ДП №2	600	30	5,88	$y = -0,145\ln(x) + 0,376$	-0,145	0,376	0,9143
ДП №2	600	45	5,88	$y = -0,18\ln(x) + 0,2305$	-0,18	0,2305	0,8997
ДП №2	600	60	5,88	$y = -0,198\ln(x) + 0,1447$	-0,198	0,1447	0,9096
ДП №2	300	20	5,95	$y = -0,148\ln(x) + 0,4293$	-0,148	0,4293	0,8935
ДП №2	300	30	5,95	$y = -0,172\ln(x) + 0,34$	-0,172	0,34	0,8705
ДП №2	300	45	5,95	$y = -0,19\ln(x) + 0,2617$	-0,19	0,2617	0,8682
ДП №2	300	60	5,95	$y = -0,2\ln(x) + 0,224$	-0,2	0,224	0,8562
ДП №2	300	20	4,26	$y = -0,136\ln(x) + 0,4845$	-0,136	0,4845	0,8969
ДП №2	300	30	4,26	$y = -0,156\ln(x) + 0,404$	-0,156	0,404	0,8856
ДП №2	300	45	4,26	$y = -0,177\ln(x) + 0,3158$	-0,177	0,3158	0,8769
ДП №2	300	60	4,26	$y = -0,189\ln(x) + 0,2555$	-0,189	0,2555	0,8844
ДП №2	300	20	8,26	$y = -0,168\ln(x) + 0,3248$	-0,168	0,3248	0,9257
ДП №2	300	30	8,26	$y = -0,205\ln(x) + 0,1806$	-0,205	0,1806	0,8984
ДП №2	300	45	8,26	$y = -0,226\ln(x) + 0,0986$	-0,226	0,0986	0,8876
ДП №2	300	60	8,26	$y = -0,242\ln(x) + 0,041$	-0,242	0,041	0,8713
ДП №2	300	20	4,26	$y = -0,143\ln(x) + 0,4388$	-0,143	0,4388	0,9407
ДП №2	300	30	4,26	$y = -0,169\ln(x) + 0,3358$	-0,169	0,3358	0,9252
ДП №2	300	45	4,26	$y = -0,193\ln(x) + 0,233$	-0,193	0,233	0,9097
ДП №2	300	60	4,26	$y = -0,21\ln(x) + 0,1832$	-0,21	0,1832	0,8737
ДП №2	450	20	8,55	$y = -0,148\ln(x) + 0,4265$	-0,148	0,4265	0,9002
ДП №2	450	30	8,55	$y = -0,18\ln(x) + 0,314$	-0,18	0,314	0,8528
ДП №2	450	45	8,55	$y = -0,195\ln(x) + 0,2449$	-0,195	0,2449	0,8611
ДП №2	450	60	8,55	$y = -0,212\ln(x) + 0,1621$	-0,212	0,1621	0,876
ДП №3	600	20	5,88	$y = -0,075\ln(x) + 0,7052$	-0,075	0,7052	0,8762
ДП №3	600	30	5,88	$y = -0,089\ln(x) + 0,6429$	-0,089	0,6429	0,8846
ДП №3	600	45	5,88	$y = -0,115\ln(x) + 0,5423$	-0,115	0,5423	0,8732
ДП №3	600	60	5,88	$y = -0,134\ln(x) + 0,4631$	-0,134	0,4631	0,8659
ДП №3	600	20	7,87	$y = -0,092\ln(x) + 0,6279$	-0,092	0,6279	0,8918
ДП №3	600	30	7,87	$y = -0,121\ln(x) + 0,5057$	-0,121	0,5057	0,8923
ДП №3	600	45	7,87	$y = -0,148\ln(x) + 0,389$	-0,148	0,389	0,8936
ДП №3	600	60	7,87	$y = -0,171\ln(x) + 0,2892$	-0,171	0,2892	0,8938
ДП №3	300	20	5,95	$y = -0,051\ln(x) + 0,7965$	-0,051	0,7965	0,8856
ДП №3	300	30	5,95	$y = -0,063\ln(x) + 0,7461$	-0,063	0,7461	0,8834
ДП №3	300	45	5,95	$y = -0,085\ln(x) + 0,6552$	-0,085	0,6552	0,8847
ДП №3	300	60	5,95	$y = -0,123\ln(x) + 0,5025$	-0,123	0,5025	0,8817
ДП №3	300	20	4,46	$y = -0,041\ln(x) + 0,8358$	-0,041	0,8358	0,88
ДП №3	300	30	4,46	$y = -0,055\ln(x) + 0,7793$	-0,055	0,7793	0,8758
ДП №3	300	45	4,46	$y = -0,077\ln(x) + 0,6902$	-0,077	0,6902	0,8757
ДП №3	300	60	4,46	$y = -0,108\ln(x) + 0,57$	-0,108	0,57	0,8666

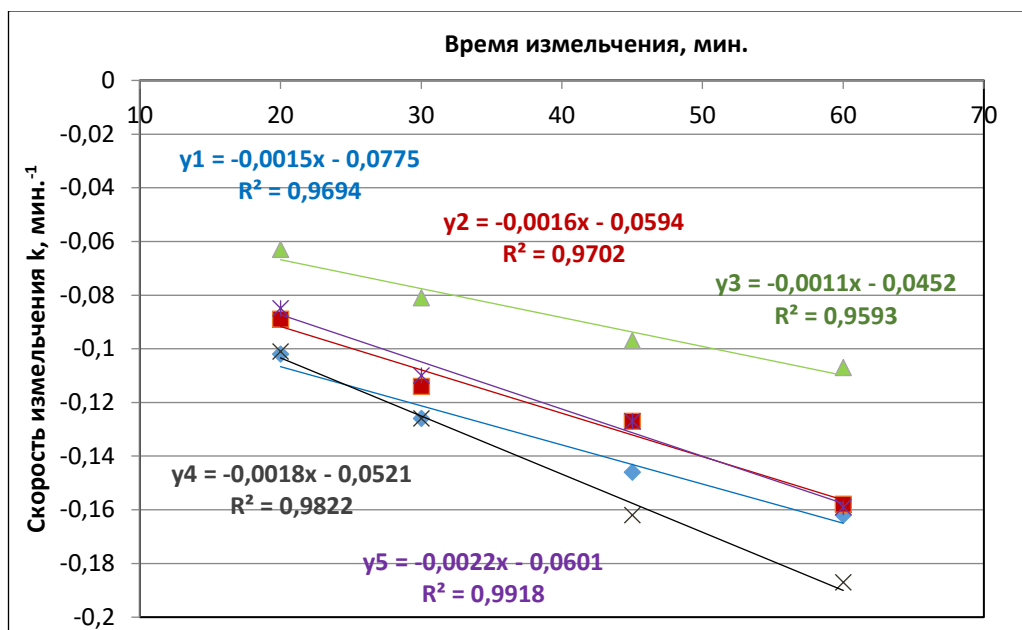


Рисунок 3.17 – Зависимость изменения постоянной скорости измельчения образца №1 от длительности процесса. Условия измельчения:

- y_1 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,084$;
- y_2 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,121$;
- y_3 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,235$;
- y_4 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,127$;
- y_5 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,161$

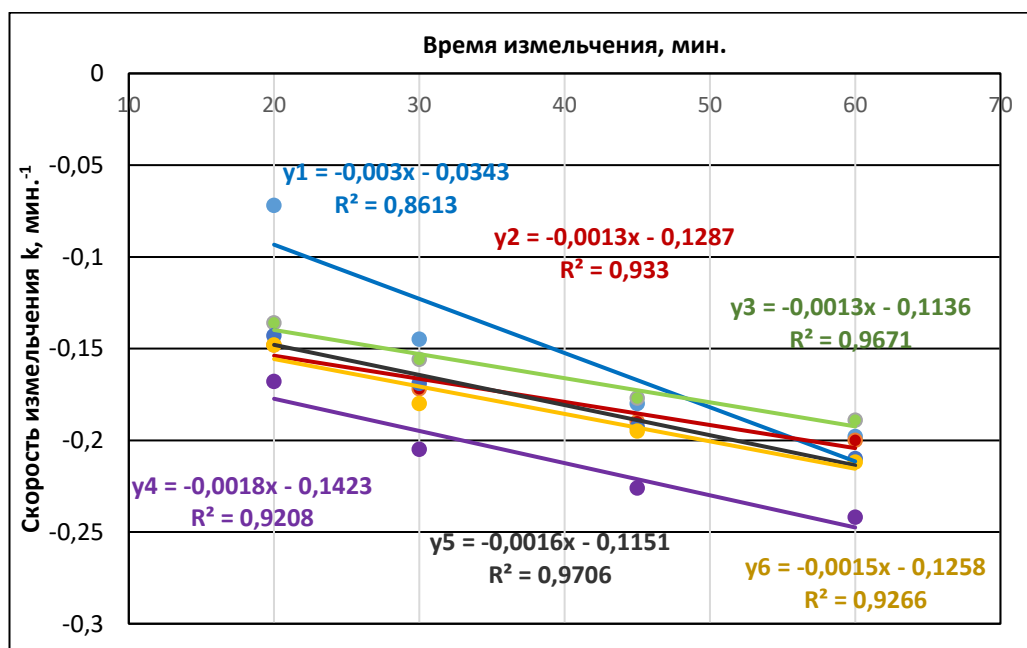


Рисунок 3.18 – Зависимость изменения постоянной скорости измельчения образца №2 от длительности процесса. Условия измельчения:

- y_1 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,170$;
- y_2 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,168$;
- y_3 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,235$;
- y_4 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,121$;
- y_5 – 450 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,235$;
- y_6 – 450 об./мин., $M_{ш}/M_3 - 0,117$

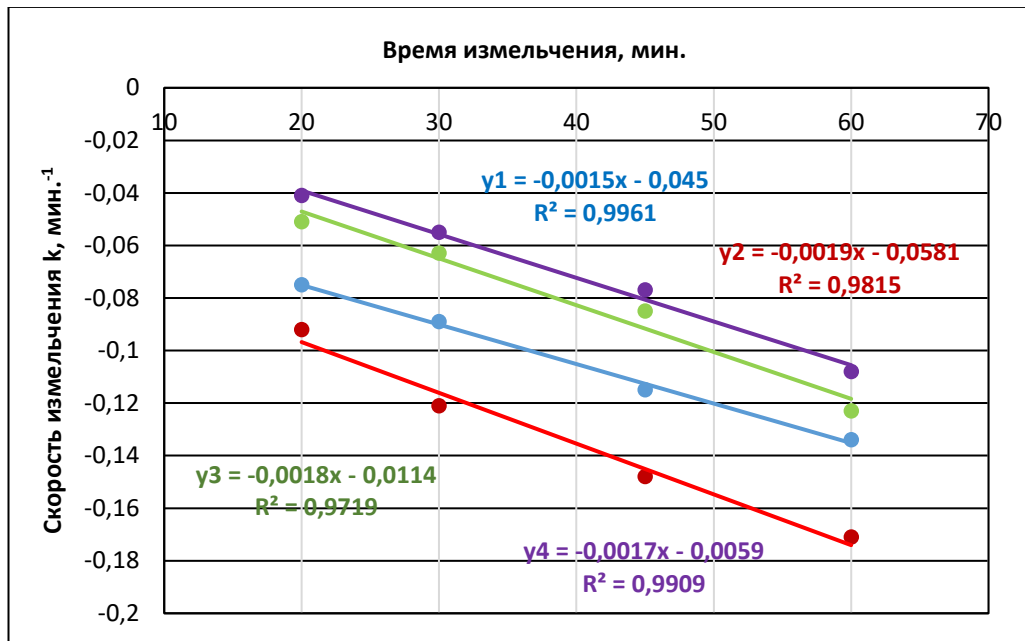


Рисунок 3.19 – Зависимость изменения постоянной скорости измельчения образца №3 от длительности процесса. Условия измельчения:

y_1 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 0,170;

y_2 – 600 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 0,127;

y_3 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 0,168;

y_4 – 300 об./мин., $M_{ш}/M_3$ – 0,223

Известно [331], что скорость или эффективность процесса измельчения материалов определяется прочностью материала, типом мельницы, а также параметрами ее загрузки и эксплуатации. Как видно из представленных иллюстраций экспериментальных данных, это правило полностью применимо и в нашем случае: константа скорости измельчения изменяет свои значения как при изменении типа материала, так в результате варьирования его параметров.

Так, в интервале длительности измельчения 20-60 минут образца №1, при скорости вращения мельницы (V_m), равной 300 и 600 об/мин и $M_{ш}/M_3 = 4,26-11,9$, постоянная процесса измельчения (k , мин.⁻¹) изменялась в пределах от 0,063 до 0,187. При той же длительности пребывания в мельнице образцов №2 и №3, но при скорости ее вращения 300, 450 и 600 об/мин и соотношениях $M_{ш}/M_3$, равных 4,26-8,26 и 4,46-7,87, изменение значений k составило следующие пределы (мин.⁻¹): 0,072-0,226 и 0,041-0,171, соответственно.

Незначительное изменение значений констант скоростей, рассчитанных для различных образцов, объясняется их близкими прочностными

характеристиками. Представленные на рисунках 3.17–3.19 графические зависимости показывают общий характер закономерности процесса измельчения для всех изучаемых материалов, что свидетельствует о корректности выбора параметров загрузки материала и условий его измельчения.

3.5. Получение порошков ультрадисперсной фракции

В рамках исследования было проведено измельчение образцов кирпичей до ультрадисперсной фракции с целью увеличения площади реакционной поверхности. Порошки ультрадисперсных размеров (рисунок 3.20) были получены путем механической обработки в планетарной мельнице модели *PM 400* производства фирмы *Retsch*. Принцип работы и конструктивные особенности мельницы подробно изложены и проиллюстрированы в главе 2.

Исходным материалом для получения ультрадисперсных порошков служила фракция ДП крупностью $-0,026+0$ мм. Выбор данной фракции обусловлен стабильностью гранулометрического и химического составов всех промежуточных фракций (таблицы 3.11 – 3.13).

Результаты показали, что при измельчении порошков строительных отходов в планетарной мельнице до ультрадисперсных фракций наблюдается значительное выравнивание их гранулометрического состава. Это позволяет использовать полученные ультрадисперсные материалы в качестве модификаторов бетонных смесей без предварительной сортировки. Химический состав порошков, полученных из различных образцов кирпичей, не претерпел существенных изменений в процессе формирования ультрадисперсных фракций.

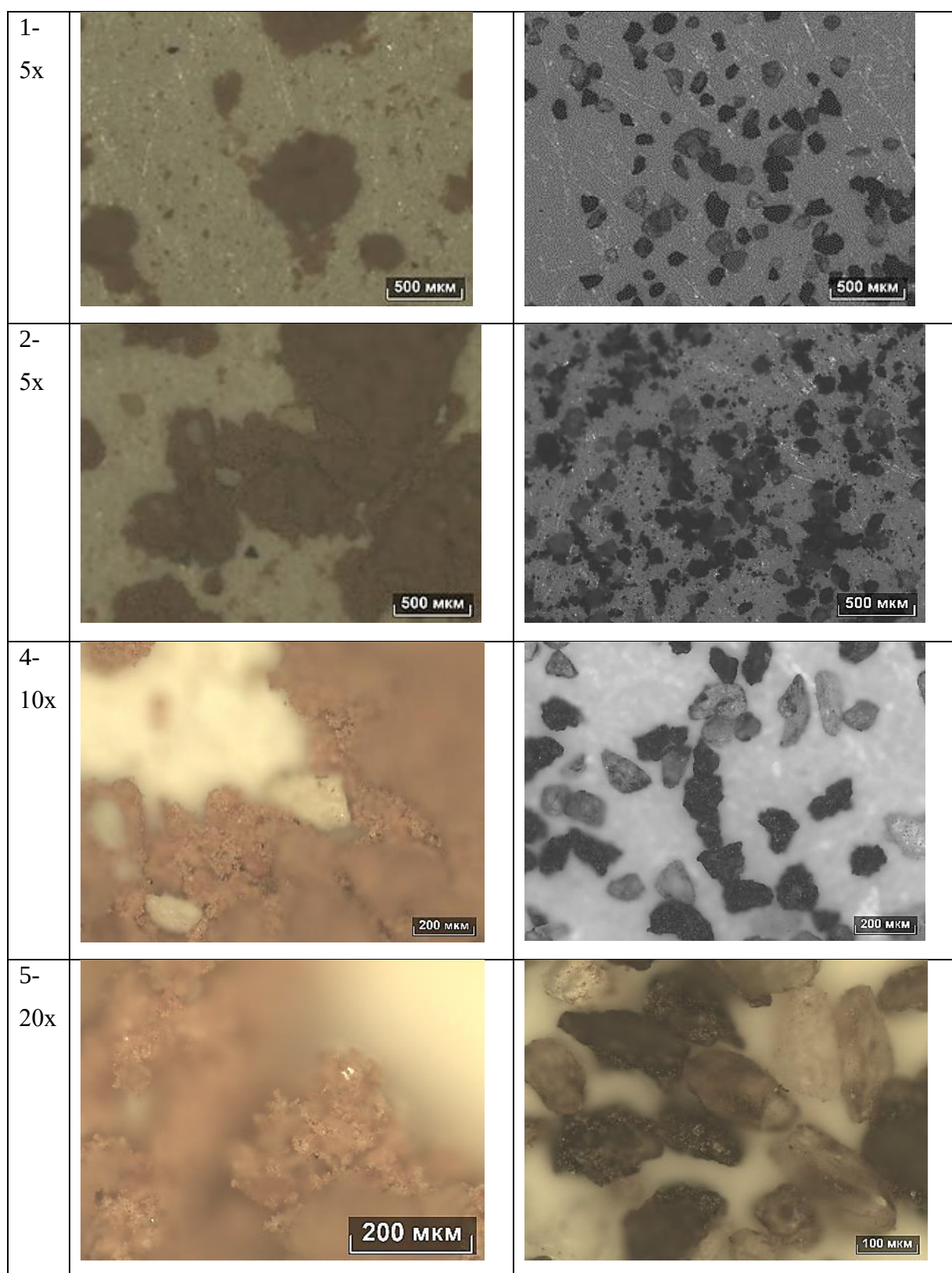


Рисунок 3.20 – Форма и размеры полученных частиц УДП

Таблица 3.11 – 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 3.12 – 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

Таблица 3.13 – Фракционный состав УДП после измельчения в планетарной мельнице

Размер, фракции, мкм	Выход фракции, %		
	УДП образца №1	УДП образца №2	УДП образца №3
– 1,000 + 0,050	16,59	18,89	20,06
– 2,000 + 1,000	29,69	29,27	30,82
– 3,000 + 2,000	20,73	20,66	21,44
– 4,000 + 3,000	11,38	12,53	13,99
– 5,000 + 4,000	8,44	8,62	8,40
– 10,000 + 5,000	13,16	10,02	5,29
– 20,000 + 10,00 0	0,01	0,00	0,00

Анализ фракционного состава УДП строительных материалов, полученных методом измельчения в планетарной мельнице, выявил общие закономерности диспергирования для всех трех образцов. Измельчение фракции размером $-0,026+0$ мм в планетарной мельнице демонстрирует практически постоянную среднюю скорость прироста ультрадисперсной фракции. Наибольший выход наблюдался для фракции размером $-2,000 + 1,000$ мкм, составив для каждого из образцов кирпичных отходов, соответственно, %: 29,69; 29,27 и 30,82.

На рисунках 3.21 – 3.23 представлено распределение размеров частиц материала после измельчения в планетарной мельнице по фракциям, определенное с использованием лазерного анализатора *FritschParticleSizer «Analysette 22»*.

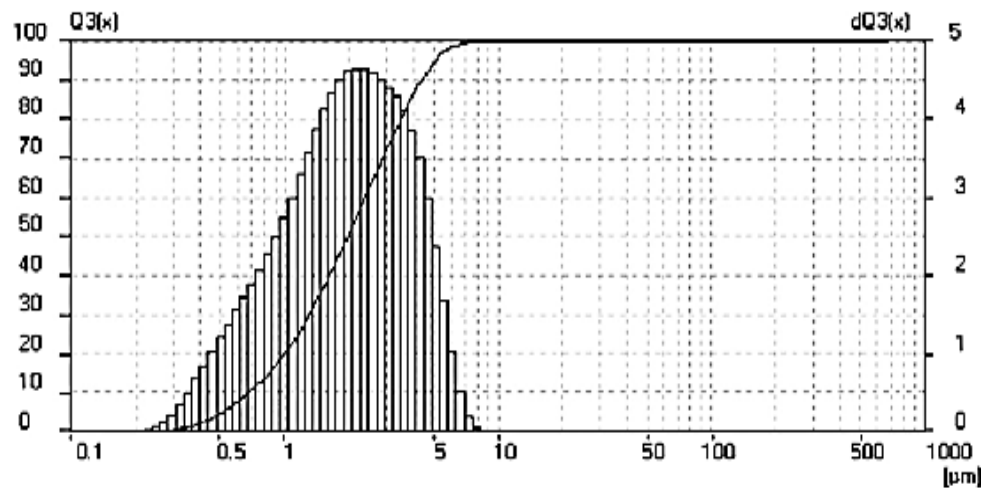


Рисунок 3.21 – Распределение размеров частиц УДП №1 по фракциям после измельчения в планетарной мельнице

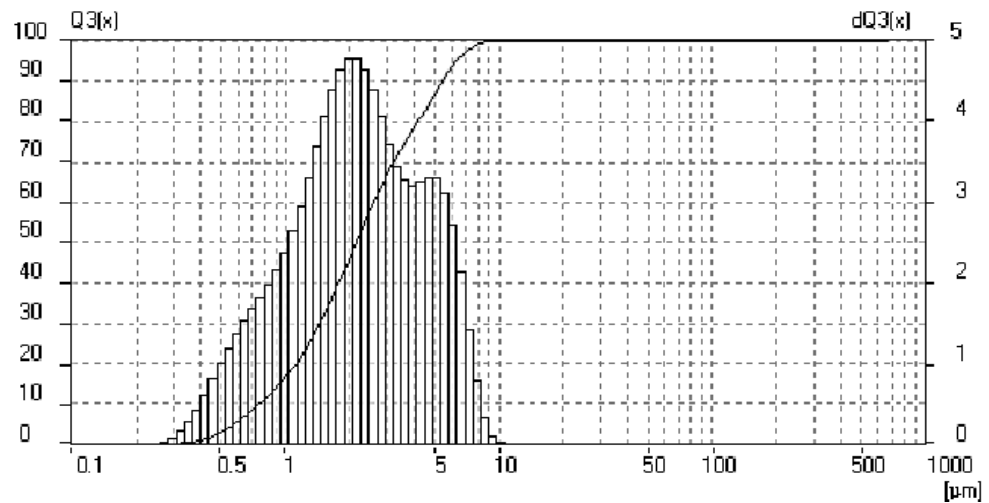


Рисунок 3.22 – Распределение размеров частиц УДП №2 по фракциям после измельчения в планетарной мельнице

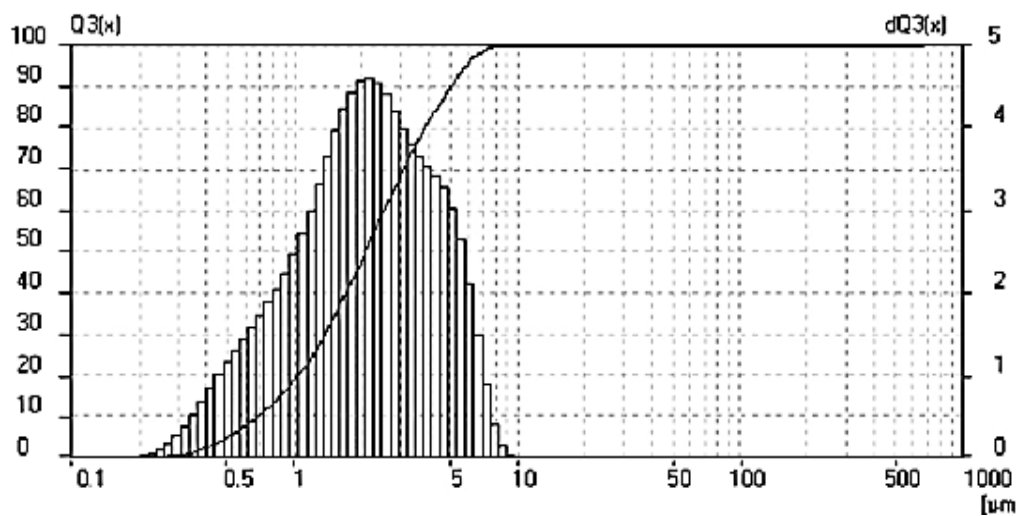


Рисунок 3.23 – Распределение размеров частиц УДП №3 по фракциям после измельчения в планетарной мельнице

Результаты исследования демонстрируют перспективность использования полученных ультрадисперсных материалов в качестве модификаторов бетонных смесей. Однако их применение связано с рядом технологических сложностей. Одной из ключевых проблем является склонность этих порошков к агрегатированию, что снижает их эффективность в качестве модифицирующих добавок.

Кроме того, на данный момент отсутствует промышленное оборудование, позволяющее массово производить УДП с необходимыми характеристиками. В связи с этим принято решение приостановить дальнейшие исследования в данном направлении.

3.6. Обработка результатов экспериментов

Для установления общей зависимости выхода фракции ДП с размерами $-0,026+0$ мм от регулируемых параметров измельчения использовали метод множественного регрессионного анализа Д. Б. Брандона. При этом в качестве регулируемых параметров использовали: скорость вращения мельницы (V_m), продолжительность измельчения (t) и соотношения масс шаровой загрузки к массе измельчаемого материала ($M_{ш}/M_3$). Результаты экспериментов представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14 – Зависимость выхода фракции -0,026+0 мм от параметров измельчения

Выход фракции -0,026+0 мм, % от загрузки)	Выход фракции -0,026+0 мм, доля от максимального, п	1-п	Загрузка мельницы измельчаемым материалом, г	Загрузка мельницы мелющими телами, шт.	$M_{ш}/M_z$	Скорость вращения мельницы, V_m , об./мин.	Время измельчения, t, мин.
Образец 1							
2,5	0,056433	0,943567	350	40	4,2589	300	20
2,8	0,063205	0,936795	350	40	4,2589	300	20
4,2	0,094808	0,905192	350	40	4,2589	300	20
7,6	0,171558	0,828442	350	40	4,2589	300	20
10,2	0,230248	0,769752	360	80	8,2781	300	20
19,6	0,442438	0,557562	360	80	8,2781	400	30
35,5	0,801354	0,198646	360	80	8,2781	600	45
32,41	0,731603	0,268397	360	80	8,2781	600	60
13,1	0,295711	0,704289	250	80	11,9190	400	20
21,5	0,485327	0,514673	250	80	11,9190	500	30
27,8	0,62754	0,37246	250	80	11,9190	600	45
44,3	1	0	250	80	11,9190	600	60
5,3	0,119639	0,880361	360	60	6,2112	300	20
10,1	0,227991	0,772009	360	60	6,2112	300	30
13,55	0,305869	0,694131	360	60	6,2112	400	45
17,53	0,395711	0,604289	360	60	6,2112	400	60
13,17	0,297291	0,702709	360	80	8,2781	400	20
13,56	0,306095	0,693905	360	80	8,2781	400	30
13,98	0,315576	0,684424	360	80	8,2781	400	20
14,67	0,331151	0,668849	360	80	8,2781	400	30
25,6	0,577878	0,422122	250	80	11,9190	500	30
26,14	0,590068	0,409932	250	80	11,9190	500	45
26,8	0,604966	0,395034	250	80	11,9190	500	60
23,16	0,522799	0,477201	380	60	6,2112	500	20
Образец 2							
0,68	0,047519	0,952481	500	80	5,961607	300	20
0,82	0,057303	0,942697	500	80	5,961607	300	30
1,26	0,08805	0,91195	500	80	5,961607	300	45
2,2	0,153739	0,846261	500	80	5,961607	300	60
0,17	0,01188	0,98812	700	80	4,258291	300	20
0,41	0,028651	0,971349	700	80	4,258291	300	30
0,69	0,048218	0,951782	700	80	4,258291	300	20
1,59	0,111111	0,888889	700	80	4,258291	400	30
3,17	0,221523	0,778477	360	80	8,279996	400	20
3,56	0,248777	0,751223	360	80	8,279996	400	30
3,98	0,278127	0,721873	360	80	8,279996	400	20
4,67	0,326345	0,673655	360	80	8,279996	400	30
0,77	0,053809	0,946191	350	40	4,258291	300	20

0,83	0,058001	0,941999	350	40	4,258291	300	30
0,88	0,061495	0,938505	350	40	4,258291	300	20
1,46	0,102027	0,897973	350	40	4,258291	300	30
3,66	0,255765	0,744235	350	80	8,516582	400	20
9,68	0,67645	0,32355	350	80	8,516582	500	30
10,08	0,704403	0,295597	380	80	7,844183	500	45
2,02	0,14116	0,85884	350	80	8,516582	400	60
4,7	0,328442	0,671558	250	80	11,92321	40	20
5,6	0,391335	0,608665	250	80	11,92321	500	30
6,14	0,429071	0,570929	250	80	11,92321	500	45
6,8	0,475192	0,524808	250	80	11,92321	500	60
3,16	0,220825	0,779175	380	60	5,883149	400	20
8,18	0,571628	0,428372	380	60	5,883149	500	45
11,1	0,775681	0,224319	380	60	5,883149	600	45
12,71	0,88819	0,11181	250	80	11,92321	600	60
9,68	0,67645	0,32355	380	80	7,844183	600	45
9,97	0,696716	0,303284	380	80	7,844183	600	60
12,71	0,88819	0,11181	250	80	11,92321	600	45
14,31	1	0	250	80	11,92321	600	60
Образец 3							
1,3	0,049242	0,950758	380	60	5,883149	300	20
5,3	0,200758	0,799242	380	60	5,883149	300	30
8,4	0,318182	0,681818	380	60	5,883149	400	45
18,58	0,703788	0,296212	380	60	5,883149	600	60
3,5	0,132576	0,867424	380	80	7,844183	300	20
10,1	0,382576	0,617424	380	80	7,844183	400	30
17,3	0,655303	0,344697	380	80	7,844183	600	45
26,4	1	0	250	80	11,92321	600	60
1,1	0,041667	0,958333	500	60	4,471192	300	20
2,7	0,102273	0,897727	500	60	4,471192	300	30
6,3	0,238636	0,761364	500	60	4,471192	300	45
9,5	0,359848	0,640152	500	60	4,471192	300	60
1,9	0,07197	0,92803	500	80	5,961607	300	20
4,2	0,159091	0,840909	500	80	5,961607	300	30
9,1	0,344697	0,655303	500	80	5,961607	400	45
17,52	0,663636	0,336364	500	80	5,961607	600	60
13,17	0,498864	0,501136	360	80	8,279996	400	45
19,54	0,740152	0,259848	360	80	8,279996	600	60
16,96	0,642424	0,357576	360	80	8,279996	600	60
18,63	0,705682	0,294318	360	80	8,279996	600	60
15,6	0,590909	0,409091	250	80	11,92321	500	30
16,14	0,611364	0,388636	250	80	11,92321	500	45
16,8	0,636364	0,363636	250	80	11,92321	500	60
13,16	0,498485	0,501515	380	60	5,883149	500	20

Для анализа влияния значимых технологических параметров на выход фракции $-0,026+0$ мм использовали полулогарифмические зависимости, описывающие процессы измельчения. Иллюстрации полученных экспериментальных зависимостей представлены на рисунках 3.24 – 3.26.

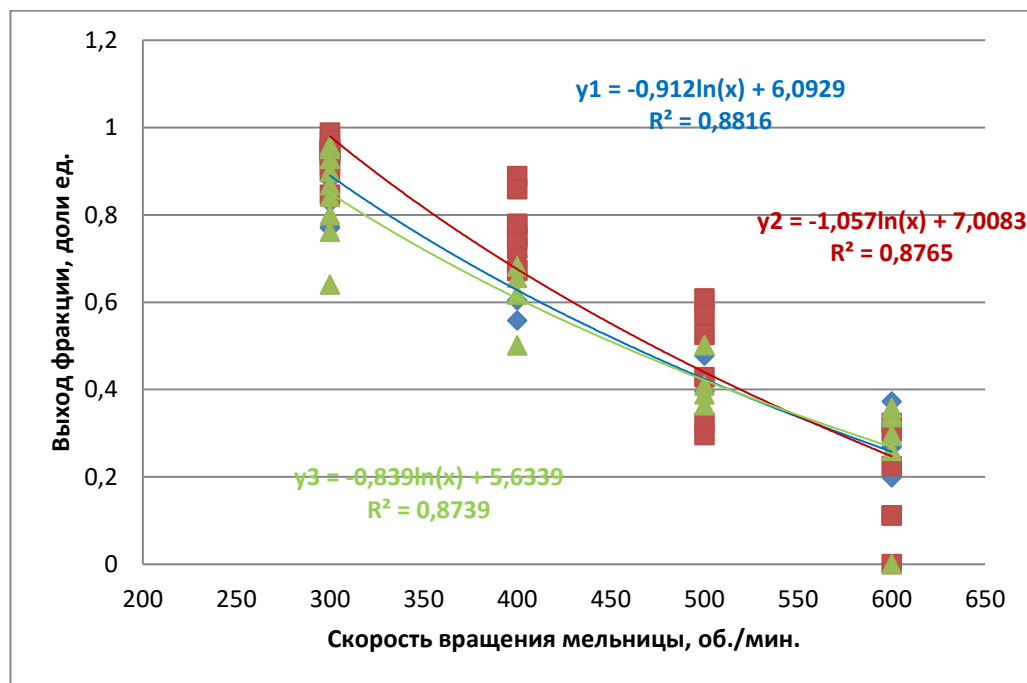


Рисунок 3.24 – Экспериментальная зависимость выхода ДП фракции $-0,026+0$ мм от скорости вращения мельницы:
 y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

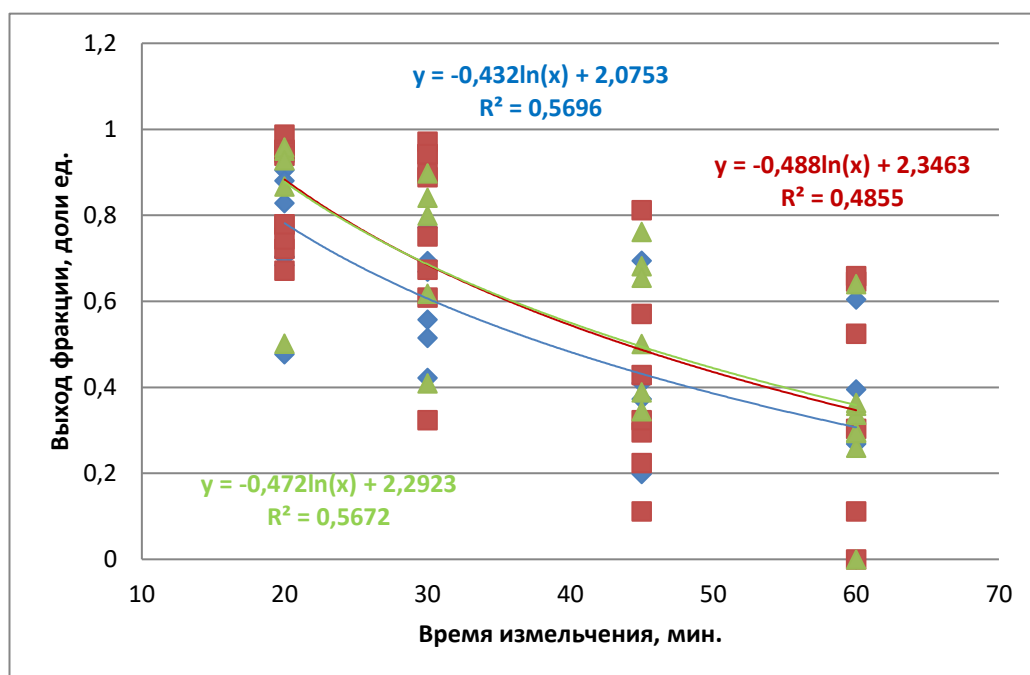


Рисунок 3.25 – Экспериментальная зависимость выхода ДП фракции $-0,026+0$ мм от времени измельчения:
 y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

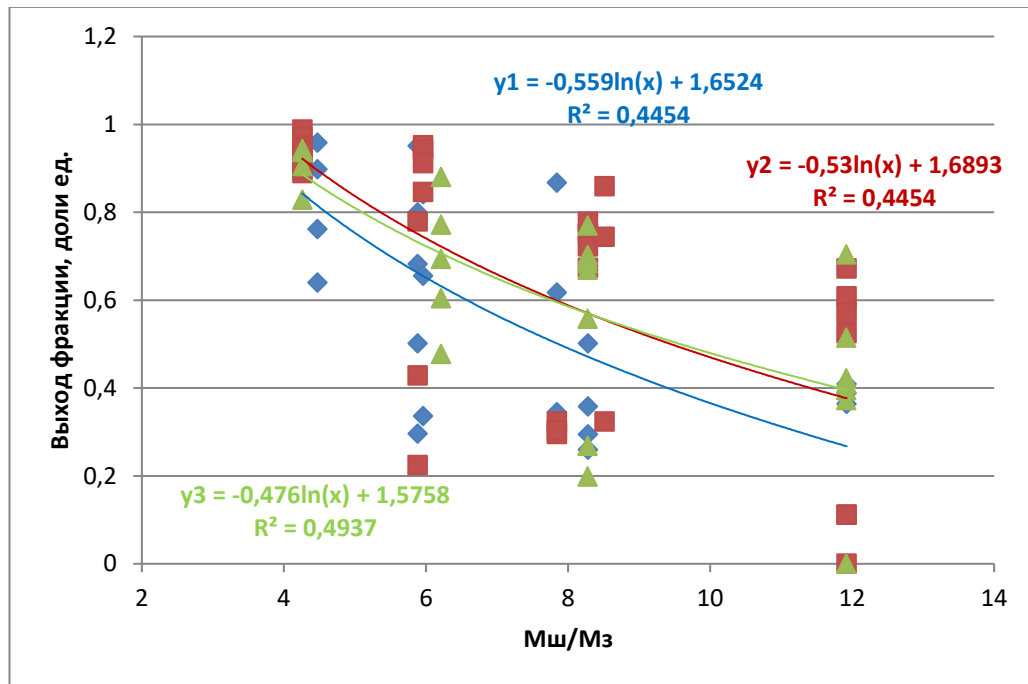


Рисунок 3.26 – Экспериментальная зависимость выхода ДП фракции -0,026+0 мм от отношения массы мелющих тел к массе измельчаемых материалов ($M_{ш}/M_z$):
 y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

Анализ экспериментальных данных, представленных на рисунках 3.24–3.26, показал, что характер зависимостей может быть описан функцией вида:

$$f(Y_i) = k_i \ln x_i + B_i, \quad (3.2)$$

где k_i и B_i — константы процесса.

На основе экспериментальных данных, приведенных в таблице 3.14, была установлена общая зависимость между долей выхода фракции -0,026+0 мм и регулируемыми параметрами процесса измельчения. Эта зависимость выражается уравнением:

$$f(Y_i) = \alpha_0 \cdot (k_1 \ln X_1 + B_1) \cdot (k_2 \ln X_2 + B_2) \cdot \dots \cdot (k_n \ln X_n + B_n), \quad (3.3)$$

где $f(X_1) \cdot f(X_2) \cdot \dots \cdot f(X_n)$ — зависимости отклика от каждого из регулируемых параметров процесса;

α_0 — уточняющий коэффициент модели;

$k_1, k_2 \dots k_n$ — константы измельчения материала;

$B_1, B_2 \dots B_n$ — постоянные логарифмирования.

Результаты расчета представлены в таблице 3.15, где X_1 — скорость вращения мельницы, об/мин.; X_2 — время измельчения, мин.; X_3 — соотношение масс мелющих тел и загрузки; $F_{эсп}$ — экспериментальный критерий Фишера.

Экспериментальное значение критерия Фишера $F_{\text{эсп.}}$ определяется по формуле:

$$F_{\text{эсп}} = \frac{R^2(n-m-1)}{(1-R^2)m}, \quad (3.4)$$

где R^2 – величина достоверности аппроксимации, n – количество экспериментов, m – количество факторов ($n = 24$, $m = 3$).

Таблица 3.15 – 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	0,494	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	0,445	5,34534

Аппроксимацией экспериментальных данных получены математические модели, описывающие зависимость доли выхода фракции ДП -0,026+0 мм от регулируемых технологических параметров (табл. 3.16).

Таблица 3.16 – Математические модели процесса измельчения образцов строительных отходов

Номер образца	Вид математической модели	v
1	$f(X_1, X_2, X_3)=0,9999997 \cdot (-0,91\ln(X_1)+6,092) \cdot (-0,194\ln(X_2)+1,629) \cdot (-0,011\ln(X_3)+0,977)$	0,065552
2	$f(X_1, X_2, X_3)=0,999971 \cdot (-1,09\ln(X_1)+7,215) \cdot (-0,153\ln(X_2)+1,505) \cdot (-0,057\ln(X_3)+1,112)$	0,086667
3	$f(X_1, X_2, X_3)=0,999129 \cdot (-0,83\ln(X_1)+5,633) \cdot (-0,21\ln(X_2)+1,665) \cdot (-0,279\ln(X_3)+1,54)$	0,063474

Анализ значений величины достоверности аппроксимации функций $f(X)$ позволил определить степень значимости регулируемых параметров, влияющих на эффективность процесса измельчения. Для всех образцов

наибольшую статистическую значимость демонстрирует параметр X_1 , представляющий скорость вращения мельницы. Вторым по степени значимости среди технологических параметров является параметр X_2 , характеризующий время измельчения. Наименьшей статистической значимостью обладает параметр X_3 , отражающий соотношение масс мелющих тел и загрузки.

Для оценки адекватности модели использовали коэффициент несовпадения Тейла, определяемый по формуле:

$$v = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \tilde{y}_i)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2} + \sqrt{\sum_{i=1}^n \tilde{y}_i^2}}, \quad (3.5)$$

где y_i и $\tilde{y}_i$ — экспериментальное и модельное значения функции, соответствующие одному набору параметров x ; n — общее количество наблюдений.

Вычисленные значения коэффициента Тейла (табл. 3.16) свидетельствуют о высокой степени соответствия полученных моделей экспериментальным данным, что подтверждает их адекватность.

3.7. Оптимизация технологических параметров измельчения

Для определения оптимальных значений регулируемых параметров процесса измельчения была выполнена математическая обработка экспериментальных данных с использованием метода обобщенного приведенного градиента (ОПГ). Этот метод описан в работе [318.] и реализован в надстройке «Поиск решения» Microsoft Excel. Оптимизация осуществлялась с учетом заданных ограничений входных параметров:

X_1 (скорость вращения мельницы) — от 300 до 600 об/мин.;

X_2 (продолжительность измельчения материала) — от 20 до 60 мин.;

X_3 (соотношение масс мелющих тел и загрузки) — от 4,26 до 11,92.

В результате обработки уравнений, представленных в таблице 3.16, были найдены расчетные зависимости выхода фракции $-0,026 + 0$ мм от регулируемых параметров измельчения (рисунки 3.27 – 3.29).

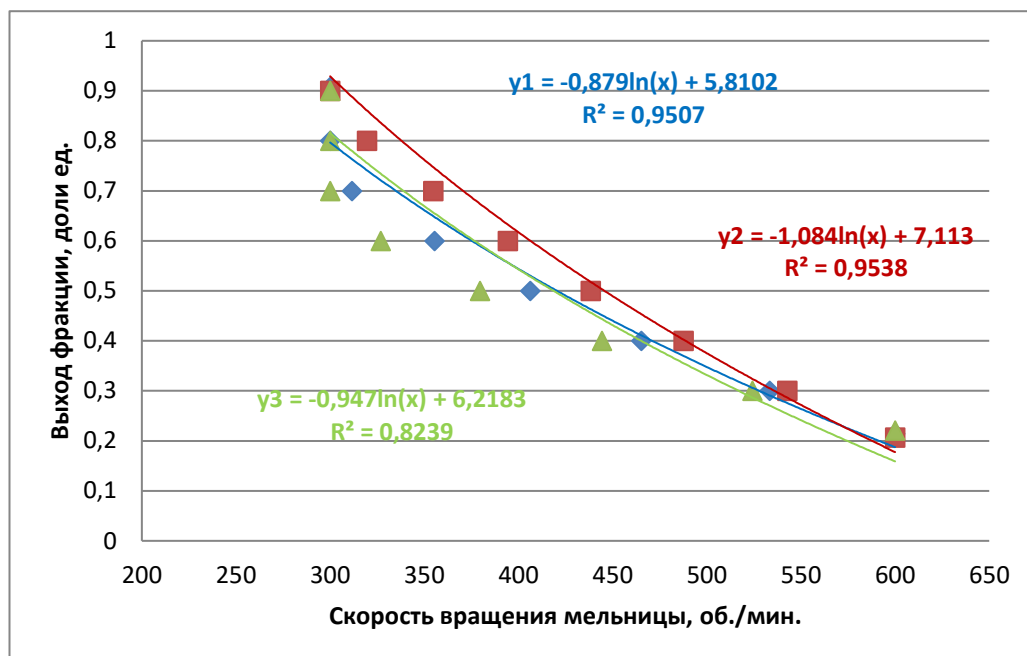


Рисунок 3.27 – Расчетная зависимость выхода ДП фракции ($-0,026+0$ мм) от скорости вращения мельницы: y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

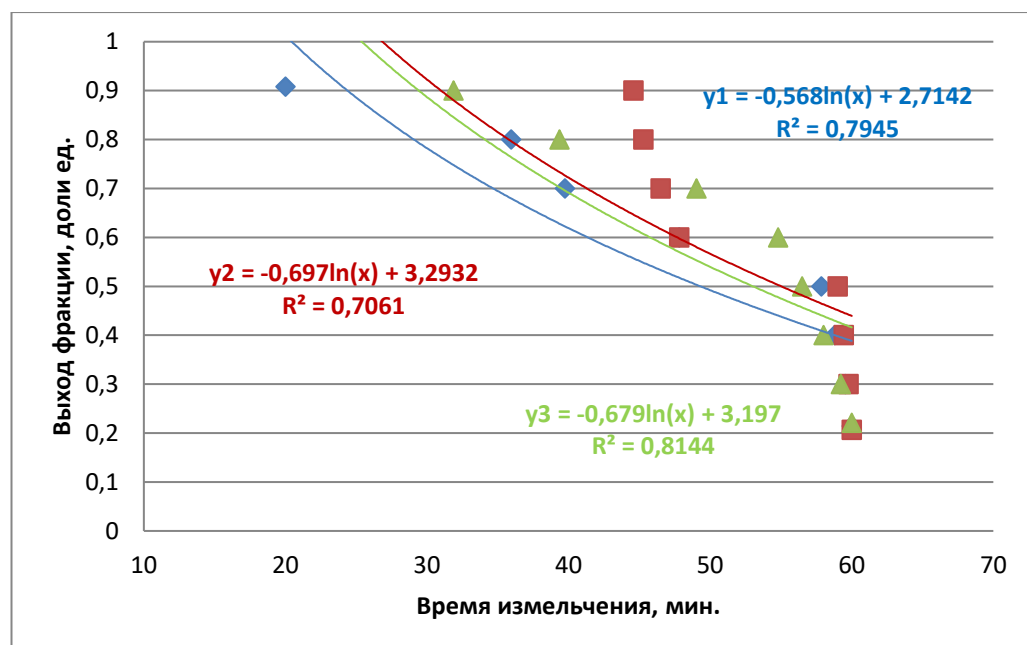


Рисунок 3.28 – Расчетная зависимость выхода ДП фракции ($-0,026+0$ мм) от времени измельчения: y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

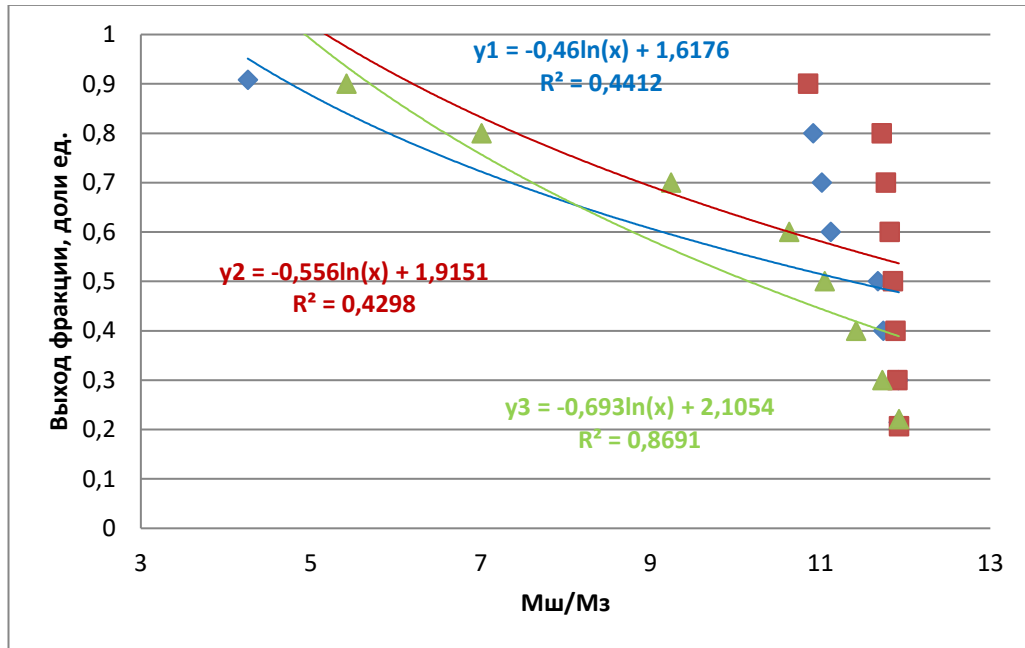


Рисунок 3.29 – Расчетная зависимость выхода ДП фракции (-0,026+0 мм) от отношения массы мелющих тел к массе измельчаемых материалов ($M_{ш}/M_z$):
 y_1 – образец 1; y_2 – образец 2; y_3 – образец 3

Полученные расчетные зависимости демонстрируют хорошую корреляцию с экспериментальными данными (рисунки 3.24 – 3.26).

Выявленные оптимальные значения регулируемых параметров процесса измельчения (X_1 – 600 об./мин., X_2 – 60 минут, X_3 – 11,92) показывают выход фракции -0,026 + 0 мм в количестве 77-78% от загруженного материала. При этом наиболее значимым параметром является скорость вращения барабана мельницы. Второе место по степени влияния на степень дисперсности полученных материалов занимает время помола. Наименьший вклад в эффективность процесса вносит параметр, характеризующий соотношение массы загруженного материала к массе мелющих тел.

3.8. Выводы по главе

1. Теоретически обоснован выбор природы и размеров компонентов для модифицирования бетонной смеси с целью повышения эксплуатационных характеристик бетона.

2. Проведено исследование химического и гранулометрического составов ДП и УДП строительных отходов. Установлены потенциальные возможности их применения в качестве модифицирующих компонентов

бетонной смеси. Проведена оценка эффективности процессов формирования дисперсной и ультрадисперсной фракций порошков при измельчении боя строительных кирпичей. Установлено, что УДП формируются исключительно при использовании методов тонкого измельчения, таких как планетарная мельница.

3. Показано, что измельчение компонентов смеси происходит независимо друг от друга. Каждый компонент характеризуется собственными закономерностями измельчения, что отражается на различии химических составов выделенных гранулометрических фракций одного и того же диспергируемого образца.

4. Изучена кинетика измельчения строительных отходов с получением ДП. Установлено, что константа скорости измельчения варьируется в диапазоне от 0,041 до 0,242 мин⁻¹ в зависимости от параметров процесса. Показано, что закономерности измельчения имеют общий характер для всех исследованных материалов, что подтверждает их применимость к различным типам строительных отходов.

5. Установлено, что для обеспечения стабильного модифицирующего эффекта порошковой добавки, ее химического и гранулометрического составов достаточно, чтобы ее крупность не превышала 0,026 мм.

6. Определены оптимальные значения регулируемых параметров процесса измельчения (X_1 – 600 об./мин., X_2 – 60 минут, X_3 – 11,92) обеспечивающие выход фракции $-0,026 + 0$ мм в количестве 77-78% от 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.

ГЛАВА 4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА, СОДЕРЖАЩЕГО ДИСПЕРСНЫЕ ПОРОШКИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

4.1. Результаты испытаний образцов бетона на прочность

В рамках лабораторных исследований было разработано и протестировано несколько составов бетонных смесей, полученных путем частичной замены цемента на различные процентные доли дисперсных порошков, полученных путем измельчения отходов кирпичей трех марок (глава 2).

Для модифицирования бетонной смеси были выбраны ДП фракцией - 0,026+0 мм. Обозначенный выбор обусловлен стабильностью химического и гранулометрического состава, а также наибольшей площадью реакционной поверхности данной фракции, что потенциально улучшает характеристики конечного материала. С целью корректной оценки влияния добавок ДП на механические свойства бетона все смеси были приготовлены с одинаковым соотношением цементного теста, воды, вяжущего и заполнителей (таблица 4.1). В качестве контрольного принимался образец без добавления ДП, соответствующий по составу бетону класса В22,5.

Таблица 4.1 – Состав бетонной смеси в пересчете на 343 см³ (объем образца кубической формы с длиной ребра 70 мм)

Компоненты бетонной смеси	Состав бетонной смеси, г					
	Контрольный образец	Модифицированный бетон				
		ДП, % от массы цемента				
		10	20	30	35	50
ДП	0	14,4	28	42,8	50,4	72,0
Цемент (ПЦ 500 Д0)	144,0	129,6	115,2	101,0	93,6	72,0
Песок	236,7	235,6	224	218,0	223,6	240,0
Щебень (-20+5 мм)	378,0	381,2	386,6	391,0	383,0	360,0
Вода	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0

В соответствии с ГОСТ 10180-2012 были изготовлены и испытаны на прочность бетонные образцы в форме куба с длиной ребер 70 мм (рисунки 4.1 – 4.3). Образцы формировались и тестировались сериями по пять штук.

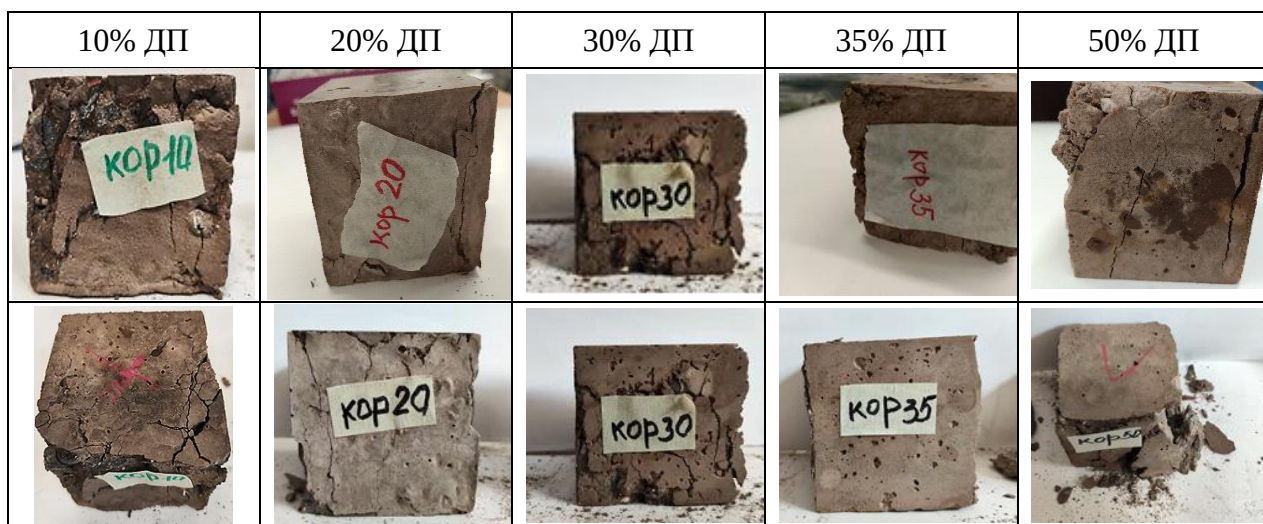


Рисунок 4.1 – Фотографии разрушений образцов бетона с различным процентным содержанием ДП №1



Рисунок 4.2 – Фотографии разрушений образцов бетона с различным процентным содержанием ДП №2



Рисунок 4.3 – Фотографии разрушений образцов бетона с различным процентным содержанием ДП №3

Проведено пять серий экспериментов с различными дозировками ДП: 10, 15, 20, 25, 30, 35 и 50 % от массы цемента. Прочность образцов на сжатие

определялась в возрасте 7, 14, 21 и 28 суток. В ходе испытаний использовали три разновидности дисперсных порошков фракцией $-0,026+0$ мм – ДП образца №1 (ДП №1), ДП образца №2 (ДП №2) и ДП образца №3 (ДП №3). Химический и гранулометрический состав дисперсных порошков, а также методики их исследований описаны в главе 3. Результаты проведенных экспериментов представлены в таблице 4.2 и на рисунках 4.4-4.6.

Таблица 4.2 – Результаты испытаний образцов бетона на сжатие через 7, 14, 21 и 28 суток

Образцы бетона	Содержание ДП	Время выдержки образца, суток			
		7	14	21	28
		Прочность на сжатие (МПа)			
Контрольный образец (№0)	0%	14,4	17,9	19,2	25,101
№1	10% ДП №1	17,888	26,676	28,776	30,756
№2	15% ДП №1	21,554	28,008	31,090	34,750
№3	20% ДП №1	30,869	34,048	37,742	40,112
№4	25% ДП №1	24,991	28,486	31,322	33,659
№5	30% ДП №1	15,686	19,881	24,226	28,665
№6	35% ДП №1	15,421	19,001	21,042	23,215
№7	50% ДП №1	15,020	18,434	20,894	21,741
№8	10% ДП №2	22,688	29,62	33,433	35,073
№9	15% ДП №2	27,531	32,32	36,06	39,400
№10	20% ДП №2	28,607	33,41	37,13	39,708
№11	25% ДП №2	19,674	25,091	29,32	32,531
№12	30% ДП №2	19,433	23,980	29,14	32,261
№13	35% ДП №2	17,474	22,420	26,892	29,400
№14	50% ДП №2	15,441	20,012	23,22	25,078
№15	10% ДП №3	17,995	22,02	26,34	27,947
№16	15% ДП №3	18,409	22,546	29,121	31,808
№17	20% ДП №3	24,606	30,01	32,98	36,615
№18	25% ДП №3	18,872	23,87	26,44	30,595
№19	30% ДП №3	17,331	22,30	25,21	27,078
№20	35% ДП №3	13,005	15,002	16,450	18,202
№21	50% ДП №3	11,24	14,36	16,02	17,225

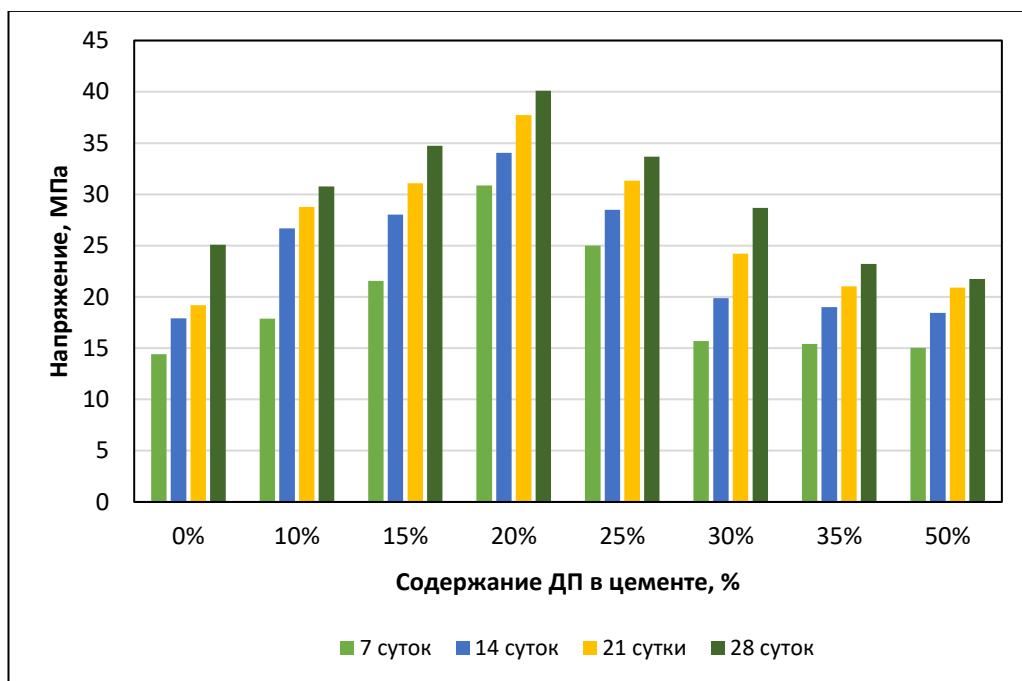


Рисунок 4.4 – Результаты испытаний на сжатие образца бетона, содержащего ДП №1

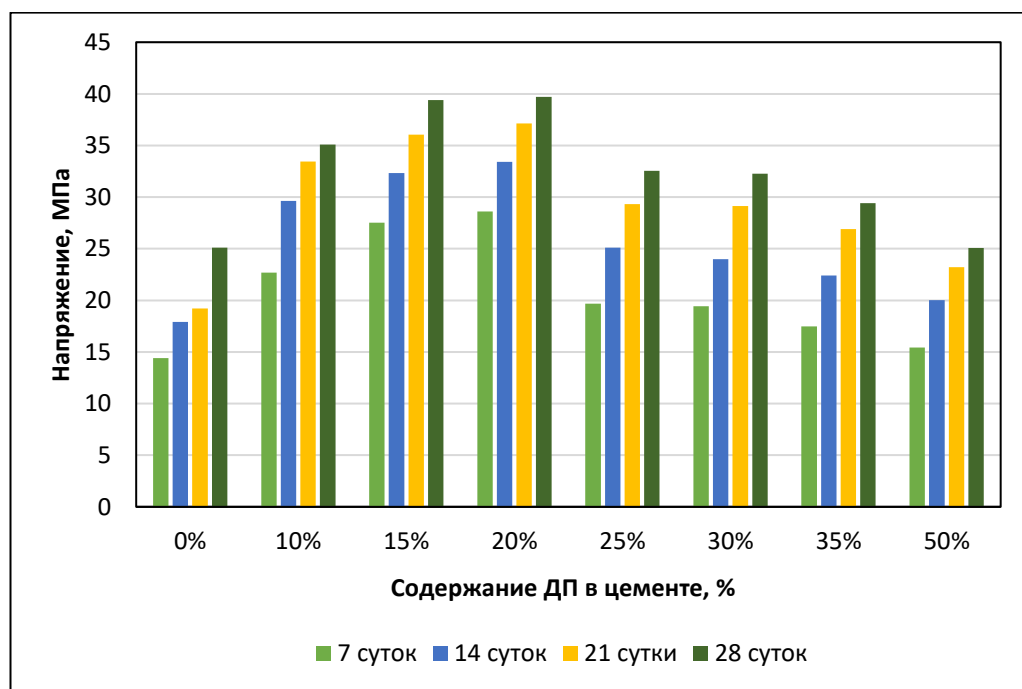


Рисунок 4.5 – Результаты испытаний на сжатие образца бетона, содержащего ДП №2

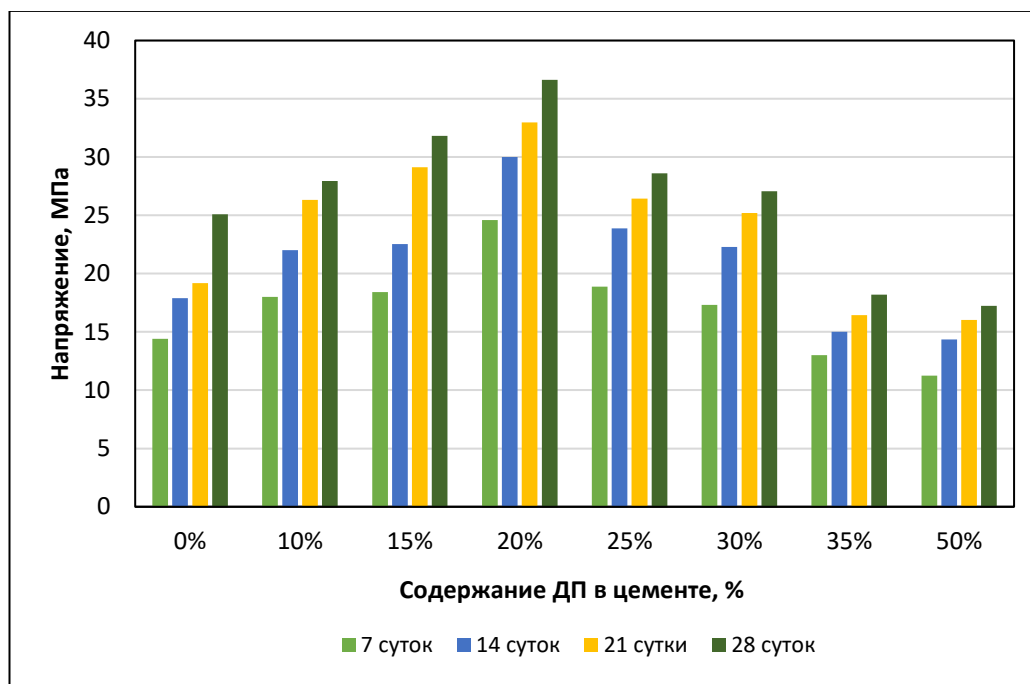


Рисунок 4.6 – Результаты испытаний на сжатие образца бетона, содержащего ДП № 3

Анализ полученных данных показывает, что прочность бетона на сжатие возрастает с увеличением времени выдержки для всех составов и количеств модифицирующих добавок (ДП) независимо от времени выдержки образца. Кроме того, показано (рис. 4.4-4.6), что максимальная прочность на сжатие модифицированного образца по сравнению с контрольным была достигнута при содержании не менее 20 % ДП. Установлено, что выдержка образцов в течение 28 дней приводит к максимальному упрочнению бетона, причем для образцов всех типов.

Повышение прочности бетонных образцов можно объяснить высоким модифицирующим эффектом частиц ДП. Введенные в состав композиции, они действуют как центры кристаллизации, обладая высокой пуццолановой активностью и способностью заполнять микропоры и пустоты в цементной матрице. Кроме того, большая реакционная площадь поверхности модификатора ускоряет течение химических реакций, связанных с увеличением доли гидратов силиката кальция и формированием плотной структуры [333 - 336].

Результаты испытаний бетонных образцов на прочность при сжатии, выдержанных в течение 28 суток, при различных концентрациях модифицирующей добавки ДП №1, представлены на рисунке 4.7. Их анализ показывает, что рост прочности наступает после введения в состав композиции модификатора ДП №1 в количестве 10-25%. Максимальные показатели прочности бетона были достигнуты после введения в цемент 20 и 25 % ДП №1. При этом превышение прочности модифицированных образцов по сравнению с контрольным составляет 59,8 и 34,1 %, соответственно.

Экспериментально установлено, что дальнейшее повышение доли ДП №1 в бетоне до концентрации 30 и 35 % отразилось незначительным снижением прочности бетонной смеси (на 1,74 и 3,82 %, соответственно). При этом показано, что максимальное снижение прочности по сравнению с контрольным образцом (8,83 %) наступает при содержании в образце 50 % ДП №1. Таким образом, оптимальные значения содержания доли модифицирующей добавки в смеси, обеспечивающие максимальную прочность бетона на сжатие, находятся в диапазоне, равном 20–25 % от массы цемента.

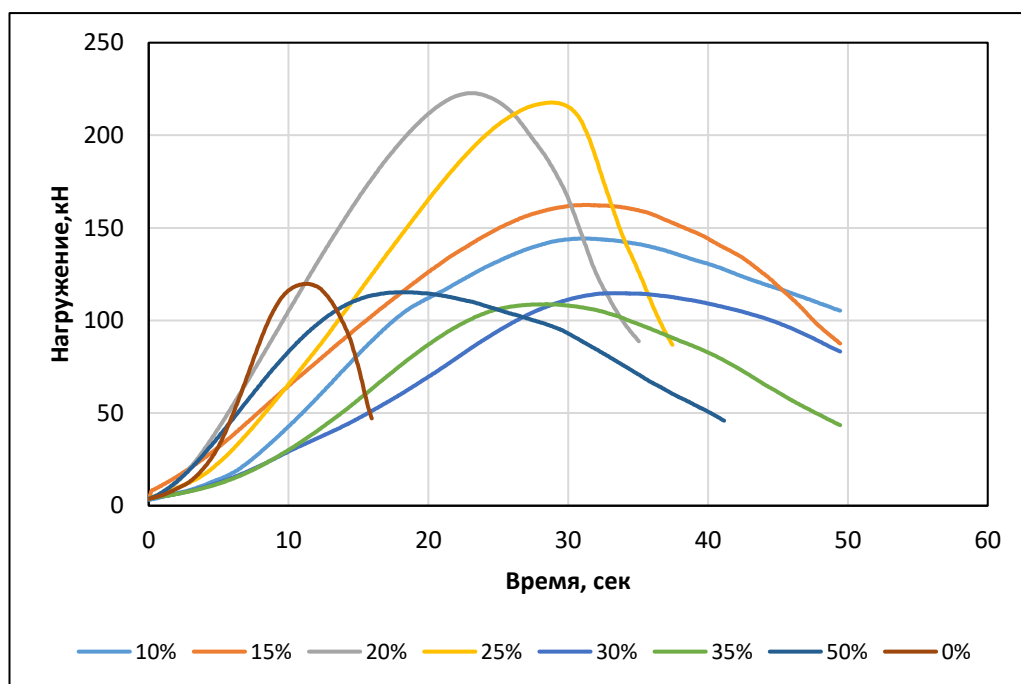


Рисунок 4.7 – Сравнительный график нагружения образцов бетона с различным содержанием ДП №1

На рисунке 4.8 представлены зависимости прочности на сжатие бетонов 28-дневной выдержки, модифицированных добавкой ДП №2 в различной концентрации. Показано, что оптимальные результаты модифицирования были достигнуты при добавлении в состав бетонной смеси 15 и 20 % ДП №2, что привело к дополнительному приросту прочности бетона на 58,1 и 57,0 %, соответственно, по сравнению с контрольным образцом.

Установлено, что добавки в бетонную смесь того же модификатора в количествах (%) 10, 25, 30 и 35 оказывают менее значительное влияние на повышение прочности бетона, а введение в состав бетонной композиции 50 % ДП №2 вовсе не приводит к изменению прочностных характеристик.

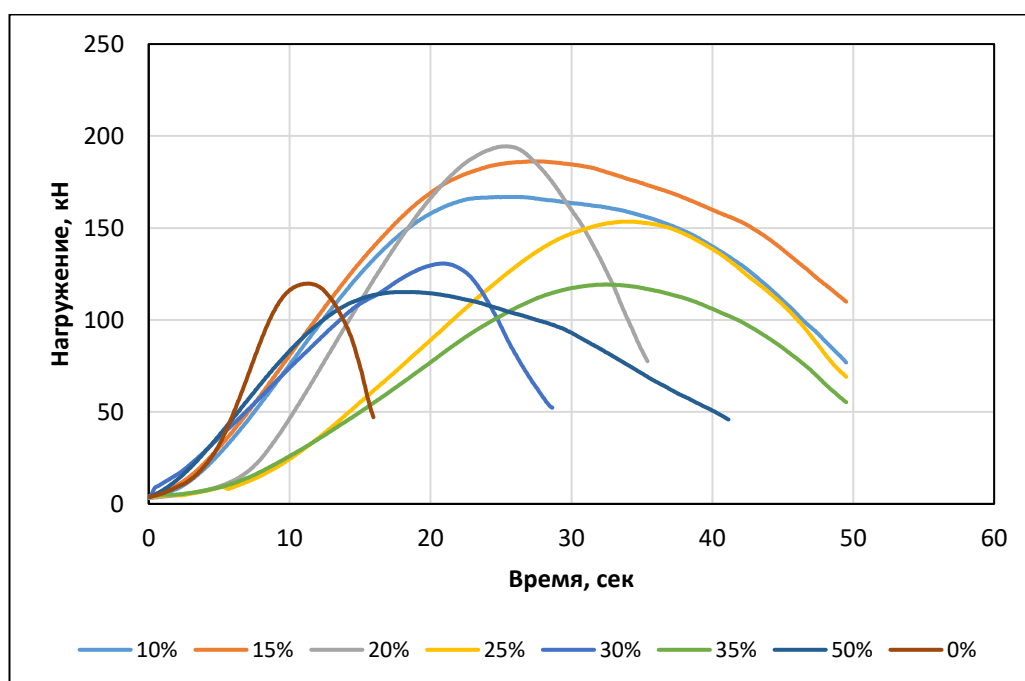


Рисунок 4.8 – Сравнительный график нагружения образцов бетона с различным содержанием ДП №2

Результаты экспериментов по модифицированию бетона добавкой ДП №3 представлены на рисунке 4.9. Видно, что характер изменения прочностных показателей в зависимости от содержания модификатора демонстрирует схожие тенденции по сравнению с бетонами, содержащими добавки ДП №1 и №2. Так, максимальное увеличение прочности на сжатие (45,96 %) было зафиксировано при использовании 20 % ДП №3. При добавлении (%) 10, 15, 25 и 30 ДП №3 наблюдалось умеренное повышение прочности на сжатие: от

7,88 до 26,7 %. При этом введение 10 и 30 % добавки показывает практически одинаковый результат по изменению прочностных характеристик контрольных образцов бетона. Также установлено, что прочность бетона, содержащего добавки ДП №3 в количествах 35 и 50 %, оказалась существенно ниже по сравнению с контрольным образцом и составила 27,5 и 32,36 %, соответственно.

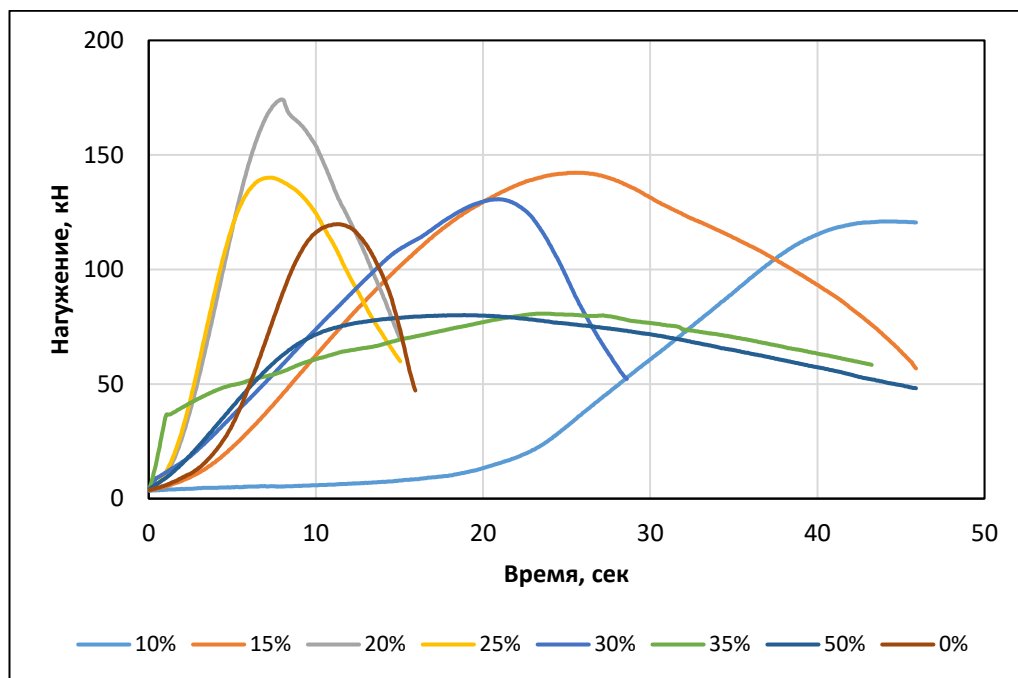


Рисунок 4.9 – Сравнительный график нагружения образцов бетона с различным содержанием ДП №3

В таблице 4.3 представлены результаты испытаний бетонных образцов на прочность после 28 суток твердения в зависимости от количества модифицирующей добавки в бетонной смеси. Анализ данных показал, что изменение прочностных характеристик бетона демонстрирует аналогичную тенденцию для всех исследуемых образцов. Во всех случаях максимальным значениям прочности отвечало введение в бетон ДП в количестве 20 % от массы цемента.

Однако было установлено, что дальнейшее повышение содержания ДП в бетоне не приводит к существенному росту прочности образцов бетона на сжатие по сравнению с контрольным образцом. При увеличении в бетоне доли ДП до 50 % и более от массы цемента наблюдается снижение прочностных

характеристик бетонных образцов по сравнению с контрольным. Последнее, вероятно, связано с агломерацией частиц модификатора в цементной матрице, приводящей к образованию в структуре материала зон, снижающих прочность бетона [137;138]. Уменьшение прочностных характеристик может быть также обусловлено осаждением на поверхности агломерированных частиц C-S-H геля, который препятствует контакту частиц внутри агломерата с зернами цемента, затрудняет их химическое взаимодействие и ухудшает адгезию между частицами ДП и зернами цемента.

Кроме того, на прочностные свойства бетона существенно влияет химический состав модификатора, что связано с различной пуццолановой активностью порошковых материалов.

Таблица 4.3 – Результаты испытаний образцов бетона на прочность на сжатие в зависимости от типа модификатора (ДП) и его содержания в цементной смеси

Содержание ДП, % от массы цемента	Параметр	ДП №1	ДП №2	ДП №3
0	Нагрузка, кН	119,33		
	Напряжение, МПа	25,10		
10	Нагрузка, кН	144,25	166,95	121,04
	Напряжение, МПа	30,76	35,07	27,95
15	Нагрузка, кН	162,35	186,23	142,26
	Напряжение, МПа	34,75	39,40	31,81
20	Нагрузка, кН	222,72	194,44	174,18
	Напряжение, МПа	46,11	39,71	36,62
25	Нагрузка, кН	217,68	153,47	140,09
	Напряжение, МПа	45,60	32,53	28,60
30	Нагрузка, кН	114,77	151,43	130,73
	Напряжение, МПа	24,67	32,26	27,08
35	Нагрузка, кН	108,79	125,24	80,72
	Напряжение (МПа)	23,22	29,4	17,23
50	Нагрузка (кН)	94,16	119,30	80,12
	Напряжение (МПа)	21,74	25,08	18,20

В таблице 4.4 представлены результаты испытаний цементной смеси, содержащей ДП более крупной фракции (-0,08+0,045 мм). Показано, что данная добавка не способствует повышению прочности бетона, а наоборот, снижает этот показатель.

Таблица 4.4 – Результаты испытаний на прочность на сжатие образцов с ДП фракцией - 0,08+0,045 мм

Содержание ДП, %	ДП №1	ДП №2	ДП №3	Контрольный образец)
20	Нагрузка, кН			
	118,703	105,948	99,248	119,332

В данном случае снижение прочностных показателей бетона связано с уменьшением площади реакционной поверхности порошков и их трансформации из реакционноспособных материалов в инертные заполнители, которые увеличивают пористость бетона и тем самым снижают его прочность [56; 337]; тогда как модификаторы более мелкой фракции индуцируют образование большего числа зародышей, которые активно участвуют в химических реакциях, повышая плотность бетона [338]. В этой связи был сделан вывод о неэффективности модифицирования бетонов ДП фракций, превышающих размеры 0,045 мм. Поэтому дальнейшие исследования с ними не проводились.

4.2. Определение модуля упругости бетонных образцов

Важнейшей характеристикой бетона является модуль упругости, отражающей его способность к упругой деформации в ответ на приложенную нагрузку. Для установления взаимосвязи между структурой исследуемого бетона и его упругими свойствами был применен метод ультразвукового тестирования. Анализ результатов измерений скорости ультразвукового импульса для образцов с различным содержанием ДП, представленных в таблице 4.5, показывает, что лучшие показатели модуля упругости демонстрирует образец, модифицированный ДП №1, показывая 67,5-88,0 % прироста модуля упругости по сравнению с контрольным образцом. Также установлено, что добавление к портландцементу модификаторов типа ДП №2 и ДП №3 обеспечило повышение модуля упругости бетона на 42,65–76,5 % и 44,5–73,96 %, соответственно. При этом наилучшие показатели модуля упругости обеспечило добавление в бетонную смесь 20% модификатора,

приведя к его росту по сравнению с контрольным образцом (%) на 88,0, 76,5 и 73,96 для ДП №1, ДП №2 и ДП №3, соответственно.

Таблица 4.5 – Результаты определения модуля упругости бетонных образцов методом ультразвукового тестирования

Содержание ДП, % от массы цемента	Модуль упругости E, ГПа		
	ДП №1	ДП №2	ДП №3
0	27,5		
10	42,71	42,33	44,5
15	50,8	43,175	45,1
20	51,70	48,54	47,84
25	50,8	45,05	46,04
30	50,04	44,14	45,02
35	47,61	43,32	44,57
50	46,41	39,23	39,74

Этот результат свидетельствует о том, что повышенная упругость цементной системы на макроуровне коррелирует с ее микроструктурой. Микроструктурные изменения способствуют замедлению разрушения матрицы и повышают ее способность поглощать энергию за счет равномерного распределения нагрузки перед разрушением. Повышение модуля упругости в композитных материалах, содержащих ДП, открывает перспективы для разработки бетонов с улучшенными механическими характеристиками. Использование дисперсных частиц строительных отходов в таких композитах позволяет значительно увеличить модуль упругости по сравнению с традиционными бетонными смесями. Это особенно актуально для проектирования высотных железобетонных конструкций, где требуется высокая прочность материала. Применение ДП в бетонных композитах может служить альтернативой традиционным методам повышения модуля упругости, таким как увеличение содержания цемента [339] и использование более твердых заполнителей [340].

Рисунки 4.10 – 4.11 и таблица 4.6 демонстрируют изменение механических свойств бетона в зависимости от содержания модификатора.

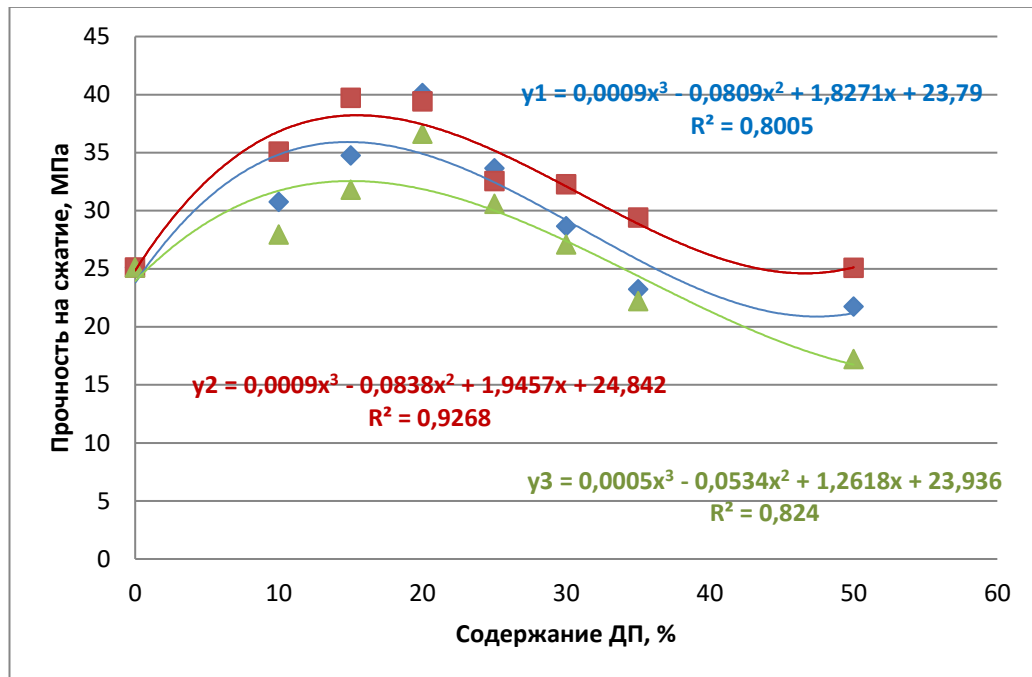


Рисунок 4.10 – Зависимость прочности бетона на сжатие от содержания ДП в цементе: y1 – бетон с добавлением ДП1; y2 – бетон с добавлением ДП2; y3 – бетон с добавлением ДП3

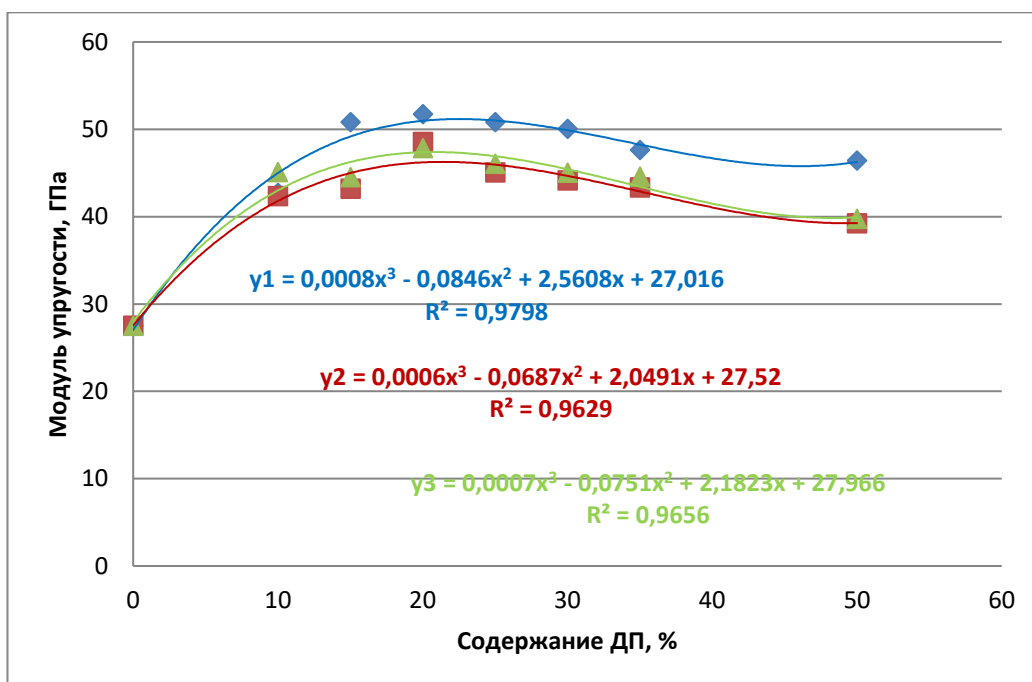


Рисунок 4.11 – Зависимость модуля упругости бетона от содержания ДП в цементе: y1 – бетон с добавлением ДП1; y2 – бетон с добавлением ДП2; y3 – бетон с добавлением ДП3

Таблица 4.6 – Механические свойства образцов бетона, содержащих в своем составе дисперсные порошки строительных отходов

Образцы бетона	Содержание ДП	Мах напряжение, 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

Математическая обработка экспериментальных данных выявила, что зависимости прочности на сжатие и модуля упругости бетонных образцов от содержания дисперсных порошков (ДП) могут быть аппроксимированы полиномиальной функцией третьей степени. Эти зависимости имеют аналогичный характер для всех исследованных образцов бетона, независимо от состава дисперсных добавок. Анализ графиков (рис. 4.10 – 4.11) показывает, что максимальная прочность образцов на сжатие достигается при содержании

ДП в диапазоне 15–20% от массы цемента. В то же время, наибольшая упругость бетона наблюдается при содержании ДП в интервале 20–25%. На основании этих данных можно сделать вывод, что для обеспечения наилучших эксплуатационных характеристик бетона оптимальной дозировкой ДП является 20% от массы цемента.

4.3. Анализ микроструктуры и химического состава полученных образцов бетона

Прочность бетона тесно связана с его структурными характеристиками, в частности, с пористостью. [56, 341]. В рамках исследования был проведен анализ морфологии и микроструктуры образцов бетона, изготовленных с частичной заменой 20% цемента на ДП различного состава по сравнению с контрольным образцом. Эксперименты проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ). Результаты исследования представлены на рисунке 4.12.

Анализ микроструктуры контрольного образца выявил его неоднородную сформированность. На микрофотографиях контрольного образца видны крупные поры и капилляры, визуализируемые в виде темных овальных пятен. Кривизна поверхности вызывает изменение площади и положения межфазной поверхности, что выражается в приращении поверхностной энергии. Увеличение межфазного натяжения усиливает влияние кривизны на внутреннее давление фаз. При этом, чем ниже дисперсность материала, тем выше внутреннее давление в системе, что может приводить к возникновению внутренних напряжений в бетоне и его разрушению.

Микроанализ образцов бетона с добавлением ДП №1, ДП №2 и ДП №3 в количестве 20 % от массы цементной смеси показывает, что модифицированные образцы характеризуются плотной структурой. При этом формирование более однородного состава происходит от третьего к первому образцу (рисунок 4.12), что хорошо согласуется с результатами определения прочности на сжатие и модуля упругости бетонных образцов.

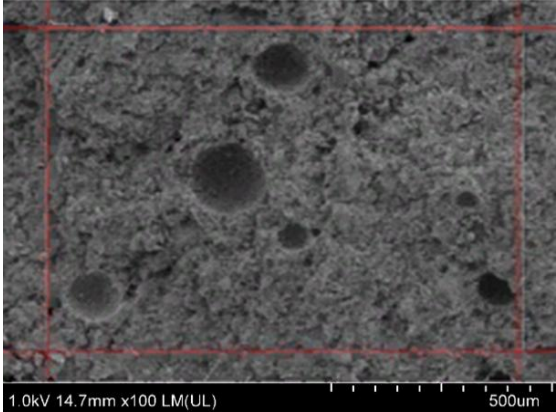
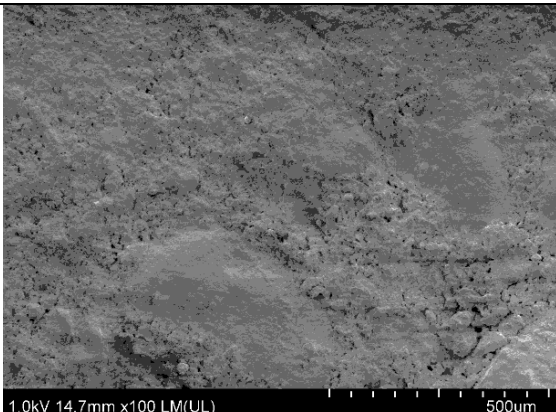
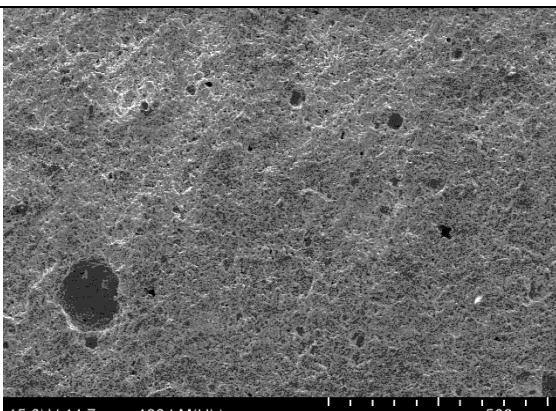
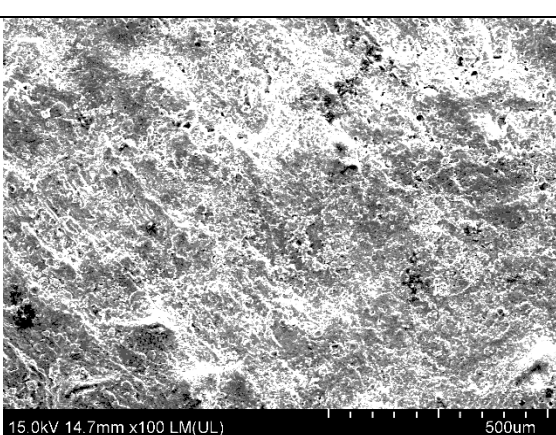
	Контрольный образец бетона
	Образец бетона с заменой 20 % цемента на ДП №1
	Образец бетона с заменой 20 % цемента на ДП №2
	Образец бетона с заменой 20 % цемента на ДП №3

Рисунок 4.12 – 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. Результаты анализа представлены на рисунках 4.13 – 4.16 и в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Фазовый состав образцов бетона по данным рентгенографического фазового анализа.

№	Фаза (минерал)	Теоретическая формула	Массовая доля, %			
			контр ольн ый образ ец	бетон с 20% ДП №1	бетон с 20% ДП №2	бетон с 20% ДП №3
1	C ₂ S 2х кальциевый \ларнит	Ca ₂ [SiO ₄]	32	3	1	5
2	C ₃ S 3х кальциевый \ хатрурит	Ca ₃ [SiO ₄]O	22	1,5	1	0,5
3	Браунмиллерит Brownmillerite	Ca ₂ Fe ³⁺ AlO ₅	3	2	2	1
4	Портландит	Ca(OH) ₂	0,5	1	2	
5	Ксонотлит Xonotlite	Ca ₆ Si ₆ O ₁₇ (OH) ₂	-	2	2	2
6	Кварц	SiO ₂	29	51	55	58
7	Плагиоклаз	(Na,Ca)Al[Si ₃ O ₈]	1	23	10	13
8	Калиевый полевой шпат	KAl[Si ₃ O ₈]	2	3	8	4
9	Пироксен	(Ca,Na)(Fe,Mg)[Si ₂ O ₆]	1	-	-	-
10	Амфибол	Ca ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ [(Al,Si) ₈ O ₂₂](OH) ₂	-	1	2	-
11	Хлорит	(Mg,Fe) ₅ Al[AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₈	0,5	-	4	2
12	Слюда Биотит-флогопит	K(Mg,Fe) ₃ [AlSi ₃ O ₁₀](OH) ₂	1	7	4	6
13	Кальцит	CaCO ₃	2	2	3	3
14	Доломит	CaMg(CO ₃) ₂	1	1	1	0,5
15	Гипс	CaSO ₄ ·2H ₂ O	2	0,5	-	-
16	Гематит	Fe ₂ O ₃	1	-	1	1
17	Минералы группы серпентина	Mg ₃ [Si ₂ O ₅](OH) ₄	-	-	1	1
Сумма кристаллических фаз			98	98	97	97

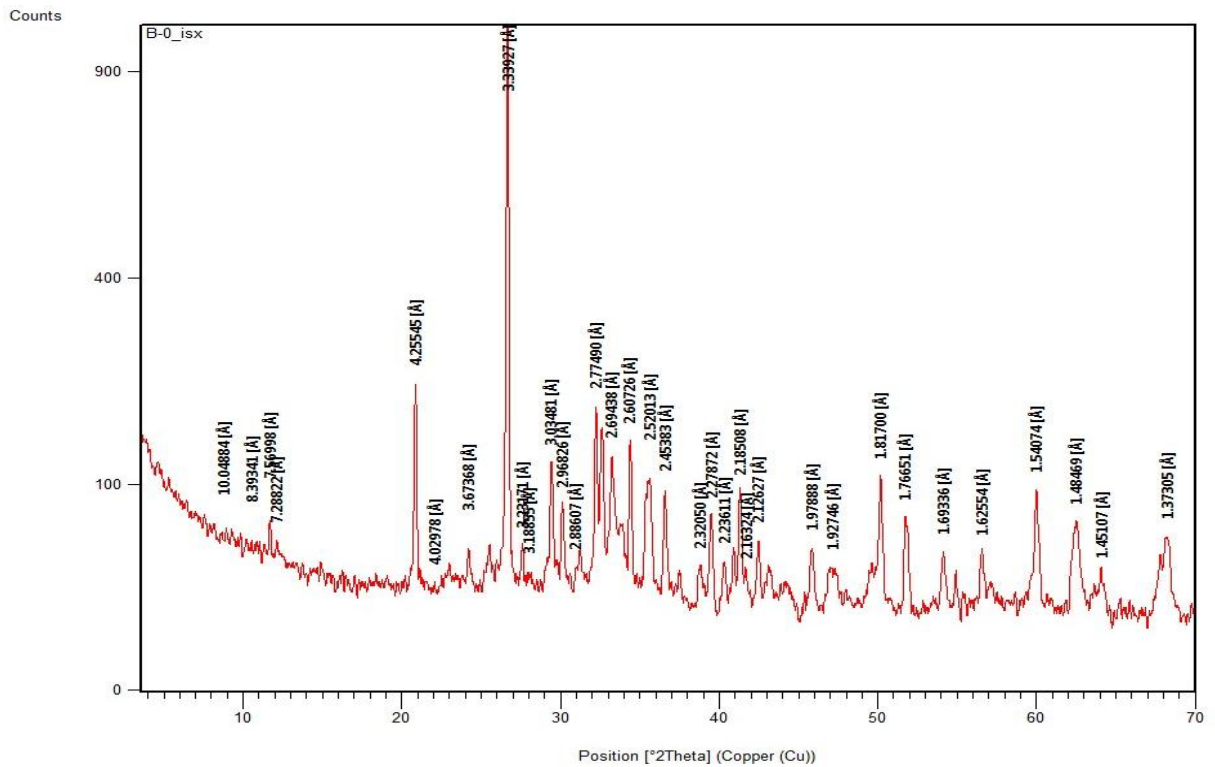


Рисунок 4.13 – Результаты рентгенографического фазового анализа контрольного образца бетона

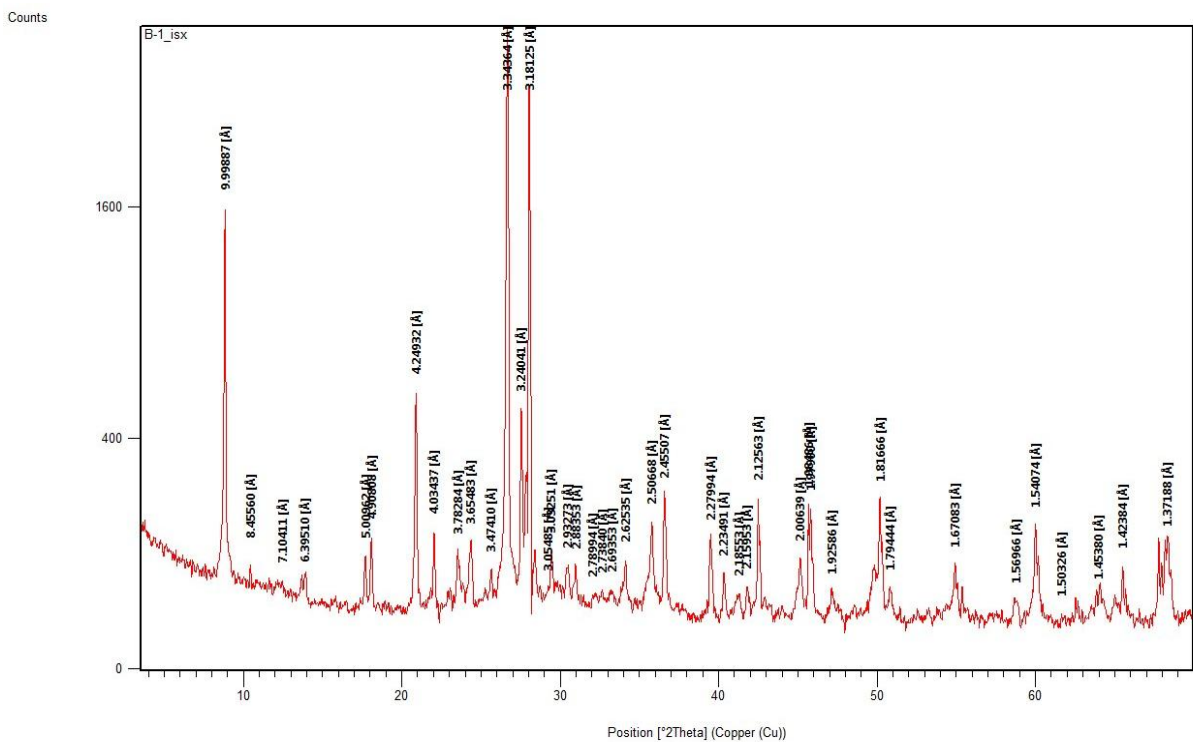


Рисунок 4.14 – Результаты рентгенографического фазового анализа бетона с 20% ДП №1

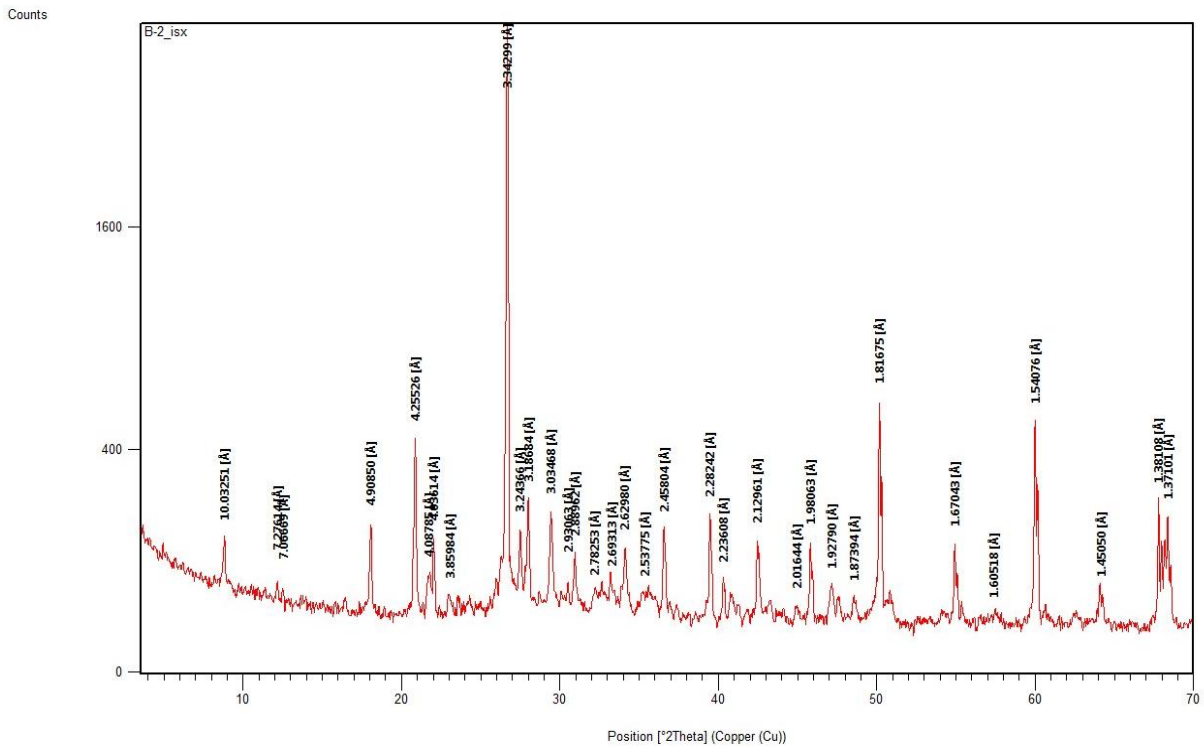


Рисунок 4.15 – Результаты рентгенографического фазового анализа бетона с 20% ДП №2

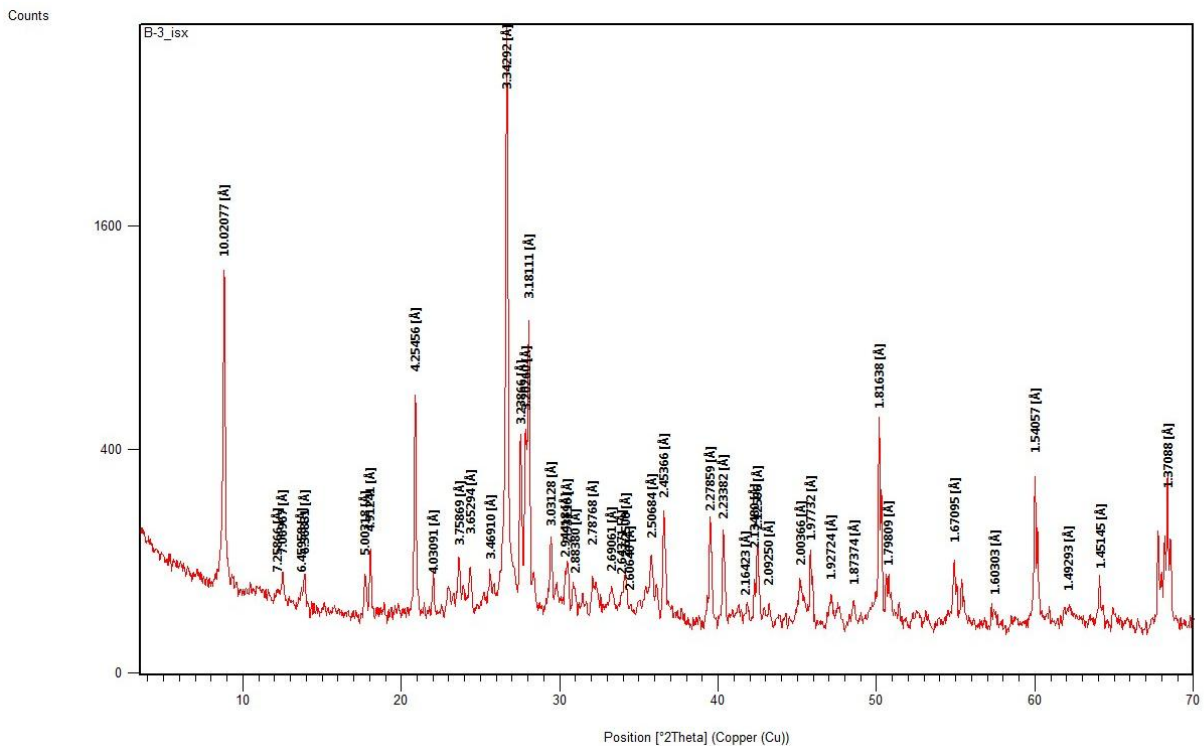


Рисунок 4.16 – Результаты рентгенографического фазового анализа бетона с 20% ДП №3

Результаты рентгенографического анализа показали, что продукты гидратации модифицированного бетона отличаются от контрольных образцов пониженным содержанием алита $\text{Ca}_3[\text{SiO}_4]\text{O}$ и белита $\text{Ca}_2[\text{SiO}_4]$ (табл. 4.7).

Предполагается, что в результате гидролиза эти минералы образуют гидросиликаты типа $C-S-H(I)$ и $C-S-H(II)$, повышающие прочностные характеристики модифицированного бетона [342].

Также отмечается увеличение содержания аморфного кварца (SiO_2) и натрий-кальциевых алюмосиликатов, таких как $(Na,Ca)Al[Si_3O_8]$, в модифицированных образцах по сравнению с исходными. Эти компоненты формируют плотные гелеобразные структуры, что положительно сказывается на прочностных свойствах бетона [355]. Образование данных структурных элементов обусловлено наличием в составе ДПСО оксидов алюминия и кремния, которые активно участвуют в реакциях гидратации и образовании новой кристаллической структуры, что приводит к увеличению количества гидроалюминатов кальция.

Результаты спектроскопического анализа (рисунок 4.17) согласуются с данными рентгенофазового исследования. ИК-спектроскопическое исследование бетонных образцов выявило различия в спектральных характеристиках модифицированного бетона и контрольного образца.

Контрольный образец демонстрирует наличие слабоинтенсивной широкой полосы поглощения в диапазоне $1400-1500\text{ см}^{-1}$, соответствующей валентным асимметричным колебаниям связей карбонатов ($\nu(C-O)$), образующихся при карбонизации портландита. Кроме того, в спектре наблюдаются максимумы на частотах ~ 1100 и 780 см^{-1} , что характерно для валентных колебаний связей ($\nu(Si-O)$) в кварце (SiO_2) и портландцементе ($CaSiO_3$), а также максимумы на частотах ~ 900 и 430 см^{-1} , соответствующие валентным колебаниям связей $Al-O$ в алюминатах.

Модифицированные образцы также содержат интенсивные полосы поглощения на частотах $\sim 1400\text{ см}^{-1}$ ($\nu(C-O)$) и $\sim 870\text{ см}^{-1}$ ($\delta(O-C-O)$), характерные для карбонатных связей, как исходных, так и образующихся при карбонизации. Эти полосы свидетельствуют о сохранении и возможном увеличении содержания карбонатов в модифицированных образцах.

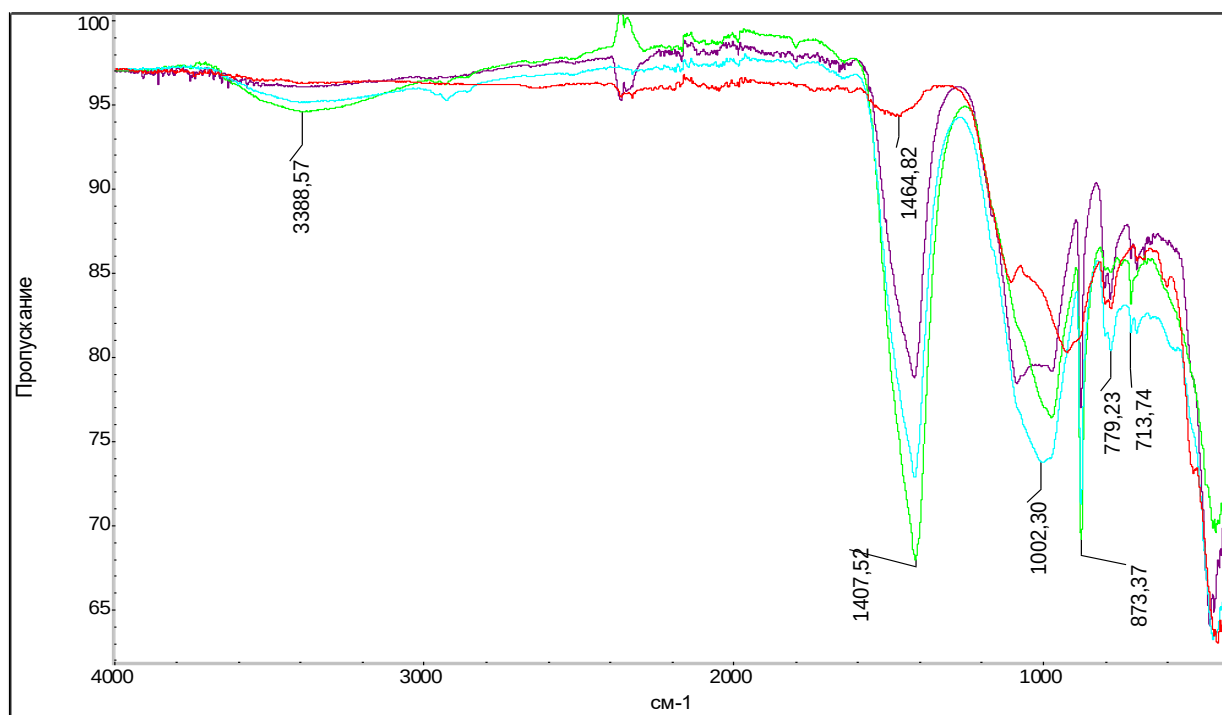


Рисунок 4.17 – Результаты спектрального анализа бетонных образцов:
 — контрольный образец; — образец 1; — образец 2; — образец 3

ИК-спектры образцов с добавкой ДП отличаются наличием слабоинтенсивной широкой полосы поглощения в области $\sim 3400 \text{ см}^{-1}$, соответствующей валентным колебаниям гидроксильных групп ($\nu(\text{O-H})$). Эта полоса может быть обусловлена как наличием высокоосновных гидросиликатов кальция, так и воды, адсорбированной на поверхности или входящей в состав портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

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 С-S-H геля в структуре модифицированного бетона. Образование С-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 С-S-H геля происходит в результате химической реакции между аморфными

алюмосиликатами, содержащимися в составе кирпича, и гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$).

4.4. Статистическая обработка экспериментальных данных

Для оценки корреляции между экспериментальными и расчетными значениями прочности бетона на сжатие была проведена серия вычислений данной характеристики с точностью до 0,1 МПа.

Расчеты выполнены на основе формулы:

$$R = \alpha \frac{F}{A} \quad (4.1)$$

где R – прочность бетона на сжатие, МПа;

F – разрушающая нагрузка, Н;

A – площадь рабочего сечения образца, мм^2 ;

$\alpha = 0,95$ – масштабный коэффициент для приведения прочности бетона к значениям, соответствующим образцам базового размера.

Среднеквадратическое отклонение прочности бетона в партии S_m , МПа, рассчитывали с использованием следующей формулы:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_m)^2}{n-1}}, \quad (4.2)$$

где R_i – единичное значение прочности бетона на сжатие, МПа;

R_m – фактическая прочность на сжатие бетона в партии, МПа;

n – общее число единичных значений прочности на сжатие бетона в партии.

Для определения текущего коэффициента вариации прочности бетона на сжатие в партии использовалась формула:

$$V_m = \frac{S_m}{R_m} \cdot 100 \quad (4.3)$$

Среднее значение коэффициента вариации прочности бетона на сжатие V_m , %, вычисляли по формуле:

$$V_m = \frac{\sum_{i=1}^n V_{m_i} \cdot n_i}{\sum_{i=1}^n n_i} \quad (4.4)$$

где Vm_i – коэффициент вариации прочности бетона на сжатие в каждой i -й партии;

n_i – число единичных значений прочности бетона на сжатие в каждой i -й партии;

$\sum_{i=1}^n n_i$ – общее число единичных значений прочности бетона на сжатие за анализируемый период.

Результаты статистической обработки прочностных характеристик модифицированного бетона представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Результаты статистической обработки экспериментальных результатов определения прочности на сжатие бетона с различным процентным содержанием ДП

Образцы бетона	Содержание ДП	Прочность при сжатии, R_i , МПа					R_m , МПа	S_m , МПа	V_m , %
№1	10% ДП №1	27,4	32,3	33,1	28,0	33,4	30,8	2,9	9,41
№2	15% ДП №1	36,2	34,0	32,7	33,6	37,2	34,7	1,88	5,42
№3	20% ДП №1	41,8	42,5	38,3	38,6	39,3	40,1	1,92	4,17
№4	25% ДП №1	30,2	35,8	34,7	31,5	36,9	33,7	2,86	6,24
№5	30% ДП №1	25,3	23,8	24,1	24,8	25,5	24,7	0,74	3,00
№6	35% ДП №1	21,4	24,1	26,0	21,6	22,9	23,2	1,91	8,22
№7	50% ДП №1	20,3	23,0	24,2	21,9	19,1	21,7	1,83	9,42
№8	10% ДП №2	37,1	35,0	32,2	34,8	36,4	35,1	1,88	5,37
№9	15% ДП №2	39,0	41,9	37,6	39,5	40,4	39,7	1,60	4,04
№10	20% ДП №2	41,5	39,5	38,2	39,8	37,9	39,4	1,38	3,5
№11	25% ДП №2	34,1	32,9	33,8	32,7	29,2	32,5	1,96	6,03
№12	30% ДП №2	31,8	30,9	33,8	30,1	34,9	32,3	1,86	5,76
№13	35% ДП №2	28,3	30,4	31,8	27,6	29,1	29,40	1,50	5,71
№14	50% ДП №2	23,9	23,3	25,9	24,1	28,2	25,1	1,99	7,93
№15	10% ДП №3	29,0	27,7	30,2	25,6	27,1	27,9	1,77	6,32
№16	15% ДП №3	34,1	28,6	33,9	27,7	34,8	31,8	3,38	10,63
№17	20% ДП №3	37,3	35,4	38,3	34,0	38,1	36,6	1,86	5,08
№18	25% ДП №3	32,1	27,8	29,9	25,6	27,5	30,6	2,49	8,71
№19	30% ДП №3	24,9	29,8	25,4	26,1	29,4	27,1	2,31	8,52
№20	35% ДП №3	16,8	20,0	18,4	17,3	18,6	18,2	1,11	6,68
№21	50% ДП №3	16,1	18,4	16,6	15,7	19,3	17,2	1,55	9,01

Статистический анализ выявил высокую степень корреляции между экспериментальными и расчетными значениями прочности исследуемых бетонных образцов на сжатие (коэффициент вариации прочности бетона на сжатие в каждой партии не превышает 10,63 %).

Анализ результатов экспериментальных исследований, представленных на рисунке 4.18, позволяет сделать вывод о том, что добавление к цементу ДП строительных отходов существенно улучшает механические характеристики бетона. Оптимальные механические характеристики бетона достигаются при введении в цемент 20 % ДП. Прочность на сжатие и модуль упругости бетонных смесей с 20 % ДП, приготовленных из различных типов строительных кирпичей, превышают 36,615 МПа и 47,84 ГПа, соответственно, через 28 дней выдержки. Это свидетельствует о повышении прочности на сжатие и модуля упругости как минимум на 46 и 73 % по сравнению с контрольным образцом. Данный эффект обусловлен высокой плотностью упаковки дисперсных твердых частиц в системе, что повышает компактность структуры и, следовательно, прочность бетона [343]. Кроме того, пуццолановая реакция, инициируемая ДП, приводит к образованию дополнительного количества C–S–H геля, который уплотняет и укрепляет границы раздела между заполнителем и цементным тестом. В результате значительно возрастают модуль упругости и прочность бетона.

Однако дальнейшее увеличение содержания ДП (более 35 %) негативно сказывается на механических свойствах бетона. Это может быть связано с агломерацией дисперсных частиц, что затрудняет их равномерное распределение в цементной матрице и приводит к снижению дисперсности системы.

Результаты исследований также показывают, что механические свойства бетонных образцов существенно зависят от удельной площади поверхности дисперсных частиц. Наилучшие результаты достигаются при использовании самой мелкодисперсной из полученных фракций ДП ($-0,026+0$ мм). Это обусловлено стабильностью химического и гранулометрического состава

частиц размером $-0,026+0$ мм, их способностью заполнять микропоры в бетонной матрице. Кроме того, эти частицы могут служить ядрами для формирования дополнительного гидрата силиката кальция (C-S-H), являющегося основным источником прочности бетона.

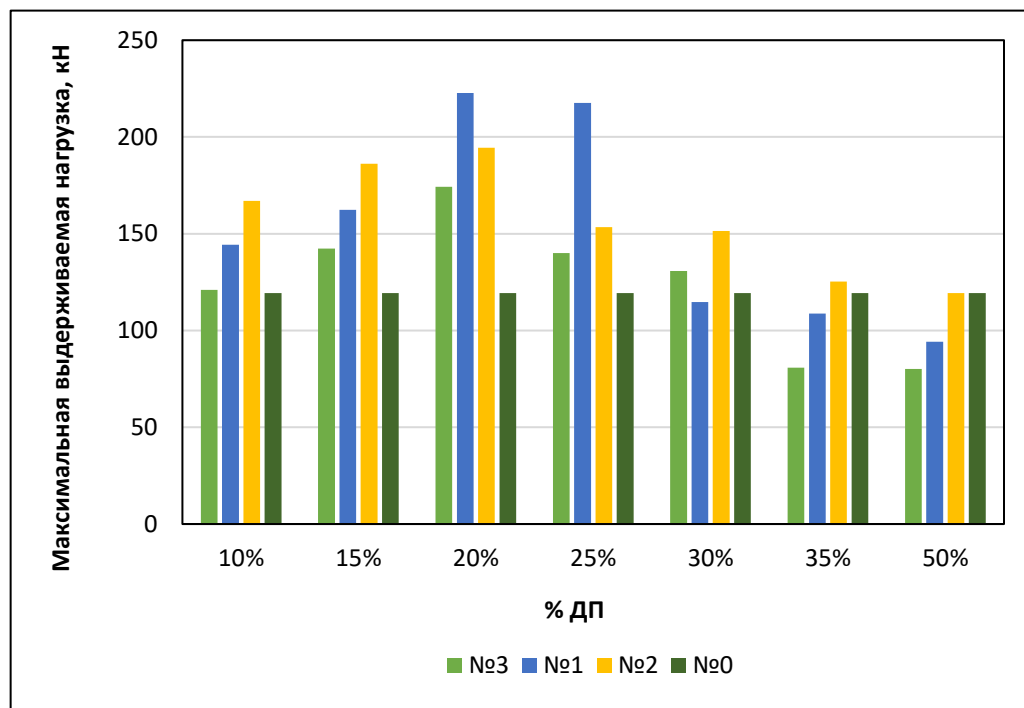


Рисунок 4.18 – Сравнительная диаграмма прочности на сжатие образцов бетона с добавлением различным количеством ДП №1, ДП №2 и ДП №3 по сравнению с контрольным образцом №0

Размер, количество и химический состав дисперсных частиц являются значимыми факторами, определяющими механические свойства бетонных материалов, модифицированных ДП строительных отходов с высоким содержанием кремния. Это согласуется с результатами, полученными в исследовании [260]. Изменения в микроструктуре бетона являются ключевым фактором, определяющим эти механические характеристики.

Бетонные композиты, включающие в свой состав дисперсные порошки, демонстрируют ряд значительных преимуществ по сравнению с бетонами, армированными натуральными волокнами крупного размера [344-346]. Данные композиты характеризуются высоким модулем упругости, эффективной адгезией между волокнами и матрицей, а также стабильными прочностными характеристиками волокон во времени. Эти особенности

обеспечивают сохранение эксплуатационных качеств бетона на протяжении длительного временного интервала.

Дисперсные порошки строительных отходов отличаются меньшей стоимостью и большей экологической безопасностью по сравнению с наноматериалами. Последние получили широкое распространение в качестве модификаторов бетонов, однако их использование связано с рядом ограничений [167], связанных с экологической опасностью материала.

4.5. Выводы по главе

1. Разработаны составы бетонных смесей, содержащих в качестве специальной добавки дисперсные порошки отходов строительных кирпичей. Гранулометрический состав порошков охватывает диапазон $-0,026+0$ мм, их содержание в смеси варьируется от 10 до 50 % от массы цемента.

2. Установлено, что введение ДП в бетонную смесь обеспечивает повышение прочности бетонов на сжатие на 13,9 – 59,8 % при содержании ДП в количестве 10–30 % от массы цемента, коэффициента упругости – на 55,27 – 88,0 % во всем диапазоне содержания ДП, по сравнению с контрольным образцом, изготовленным по классической технологии.

3. Показано, что наилучшие механические показатели бетона обеспечивает добавка к цементу 20 % ДП, обеспечивая повышение прочности бетонных композиций при сжатии по сравнению с контрольными образцами на 46 – 83 %, а модуля упругости – на 74 – 88 %. Установлено, что применение в смеси более высоких долей ДП (более 35 % от доли цемента) приводит к понижению механических свойств бетона.

4. Математической обработкой экспериментальных данных установлено, что зависимости прочности на сжатие и модуля упругости бетонных образцов от содержания в бетонной смеси дисперсных порошков (ДП) могут быть аппроксимированы полиномиальной функцией третьей степени.

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

ГЛАВА 5. РАСЧЕТ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТИПОВОГО ЗДАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БЕТОНА, МОДИФИЦИРОВАННОГО ДП СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Для оценки эффективности применения бетона, модифицированного ДПСО, проведено численное моделирование ключевых элементов конструкции типового трёхэтажного здания школы. В качестве объектов исследования выбраны: стандартное перекрытие и колонна, выполненные с использованием разработанных составов бетонных смесей. Моделирование железобетонных элементов и анализ их напряжённо-деформированного состояния под воздействием внешних нагрузок осуществлялись с применением программного комплекса ANSYS. Расчеты базировались на механических свойствах модифицированного бетона, детально проанализированных в главе 4.

Конструктивная схема здания выполнена по каркасной системе. Каркасная конструкция спроектирована с использованием монолитного железобетона. Основные несущие элементы каркаса включают колонны, балки, диафрагмы жесткости и перекрытия. Шаг элементов каркаса составляет 200 мм. Все узлы сопряжения балок с другими элементами конструкции выполнены с обеспечением необходимой жесткости.

Плиты перекрытий всех этажей и плиты покрытия имеют толщину 200 мм. Их армирование осуществляется с использованием продольной арматуры класса А500С и поперечных поддерживающих элементов из арматуры того же класса. Диаметр стержней определяется на основании расчетов. Основной армирующий слой создается с использованием стержней диаметром 20 мм класса А500С, расположенных с шагом 200 мм как в верхней, так и в нижней части плиты. Поперечное поддерживающее армирование выполняется из гнутых элементов класса А240, расположенных в шахматном порядке с шагом 400 мм. Дополнительное усиливающее армирование выполняется стержнями класса А500С диаметром от 12 до 18 мм, параметры которых определяются на основе расчетных данных [347].

В рамках исследования выполнен расчет следующих конструктивных элементов здания:

1. Стандартного перекрытия, представленного железобетонной плитой размерами 600х600 мм и толщиной 200 мм.

2. Колонны, проектные размеры которой составляют: поперечное сечение 350х350 мм, высота 3900 мм.

Представленные расчёты были реализованы для четырёх типов бетона: бетона класса В22,5 в качестве контрольного образца (обозначен как бетон №0) и бетонов, модифицированных добавками ДП №1, ДП №2 и ДП №3 в количестве 20% от массы цемента (бетон №1, бетон №2 и бетон №3 соответственно).

5.1. Описание математической модели для численного расчета

Расчет железобетонной конструкции в программном комплексе ANSYS выполняется в несколько этапов.

1. Построение геометрии. На первом этапе создается геометрическая модель конструкции. Она состоит из твердотельных элементов, представляющих бетонную балку, и линейных элементов, моделирующих арматуру. Геометрия может быть разработана с использованием модуля DesignModeler или импортирована из систем автоматизированного проектирования (CAD-систем).

Для расчёта использована арматура класса А500С диаметром 20 мм с расчётным сопротивлением растяжению 435 МПа. Общий вид расчётной модели представлен на рисунке 5.1.

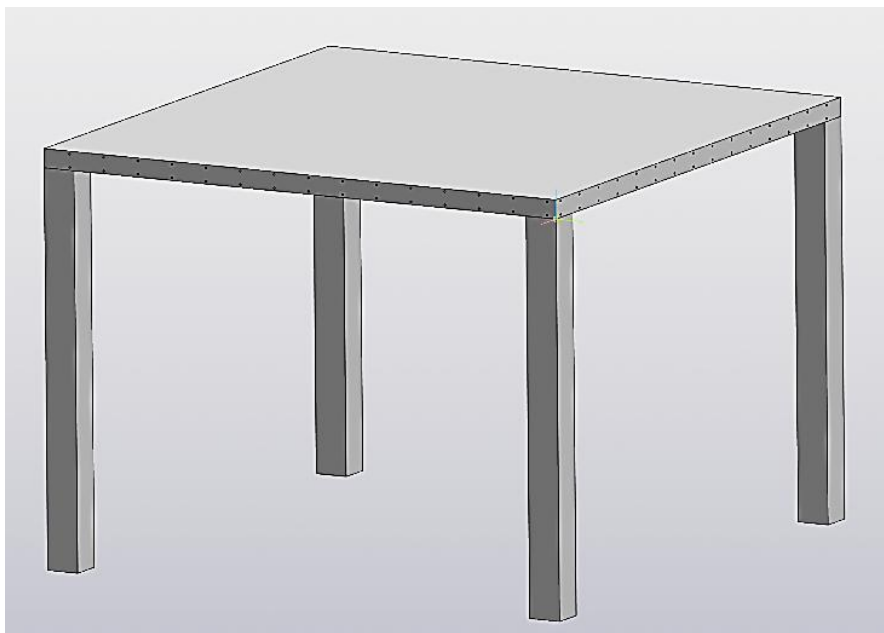


Рисунок 5.1 – Общий вид расчетной модели

Для повышения эффективности вычислительных процессов расчётная модель была разделена на отдельные сегменты по плоскостям симметрии. На границах этих сегментов были применены соответствующие симметричные граничные условия (рисунок 5.2).

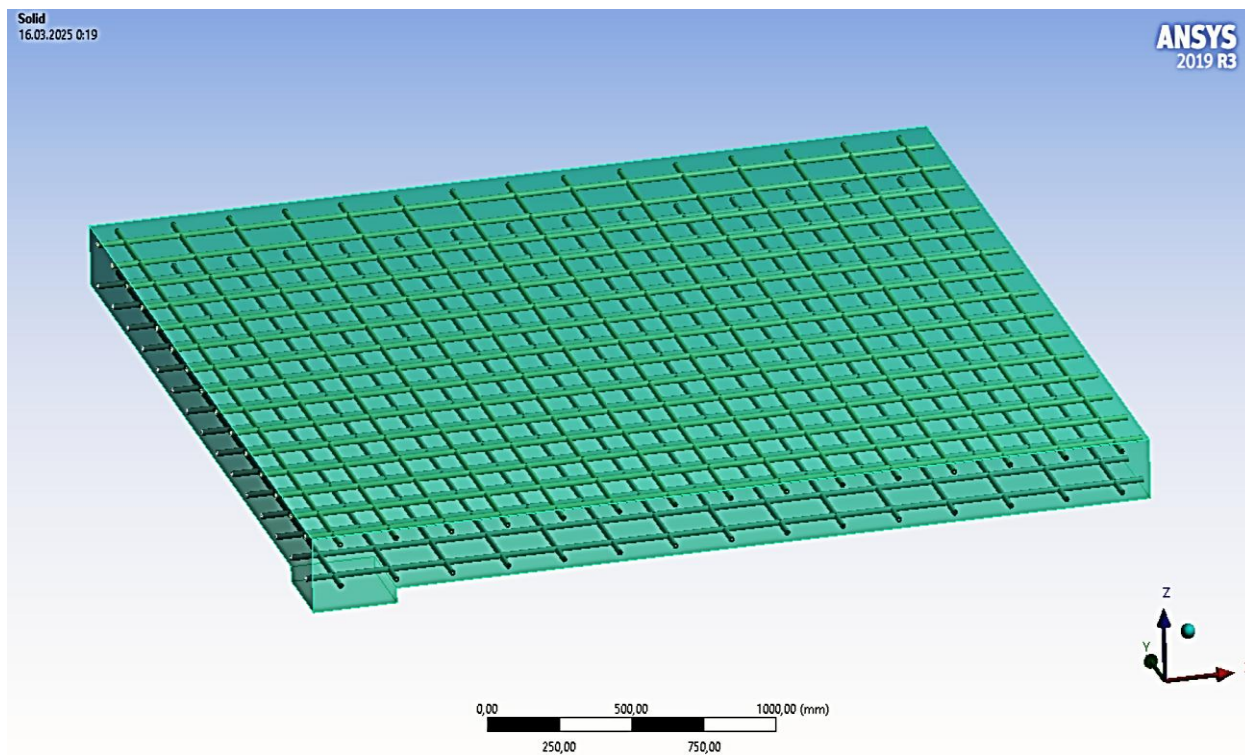


Рисунок 5.2 – Расчётная модель

2. Задание свойств материалов. Для моделирования поведения бетона и арматуры в элементах строительных конструкций задаются их базовые механические характеристики, включая модуль упругости, коэффициент Пуассона и предел прочности на сжатие. В таблице 5.1 представлены механические свойства контрольного образца и модифицированных бетонов, определенные на основании результатов испытаний, приведенных в таблице 4.8.

Таблица 5.1 – Механические свойства бетонов

Тип бетона	Кубиковая прочность, кН	Модуль упругости, ГПа	Плотность, кг/м ³	Расчетное сопротивление сжатию, МПа
Бетон №0	119,332	27,5	2236	25,101
Бетон №1	222,722	51,7	2304,2	40,11
Бетон №2	194,439	48,54	2294,2	39,4
Бетон №3	174,178	47,84	2291,8	36,62

Расчетное сопротивление растяжению принято в соответствии с ближайшими аналогами марок бетона (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Расчетное сопротивление растяжению разработанных составов бетонов

Тип бетона	Класс прочности	Расчетное сопротивление растяжению, МПа
Бетон №0	B22,5	1,95
Бетон №1	B35	2,75
Бетон №2	B30	2,60
Бетон №3	B27,7	2,45

Механические свойства используемых материалов заданы в соответствии с исходными данными (рисунок 5.3).

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Concrete				G
4	Concrete 2				G
5	Concrete 3				G
6	Concrete 4				G
7	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 7: Structural Steel					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	7850	kg m^-3		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	2E+11	Pa		
9	Poisson's Ratio	0,3			
10	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa		
11	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa		
12	Strain-Life Parameters				
20	S-N Curve	Tabular			
24	Tensile Yield Strength	435	MPa		
25	Compressive Yield Strength	435	MPa		
26	Tensile Ultimate Strength	600	MPa		
27	Compressive Ultimate Strength	0	Pa		
28	Isotropic Thermal Conductivity	60,5	W m^-1 ...		
29	Specific Heat, C _p	434	J kg^-1 C...		
30	Isotropic Relative Permeability	10000			
31	Isotropic Resistivity	1,7E-07	ohm m		

a)

Outline of Schematic A2: Engineering Data					
	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data				Source
2	Material				
3	Concrete				
4	Concrete 2				
5	Concrete 3				
6	Concrete 4				
7	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 3: Concrete					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables		Table		
3	Density	2236	kg m^-3		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	30000	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,18			
10	Bulk Modulus	1,5625E+10	Pa		
11	Shear Modulus	1,2712E+10	Pa		
12	Tensile Yield Strength	0	Pa		
13	Compressive Yield Strength	0	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5	MPa		
15	Compressive Ultimate Strength	119,33	MPa		
16	Isotropic Thermal Conductivity	0,72	W m^-1 C...		
17	Specific Heat, C _p	780	J kg^-1 C...		

b)

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data				Source
2	Material				
3	Concrete				
4	Concrete 2				
5	Concrete 3				
6	Concrete 4				
7	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data				Source
2	Material				
3	Concrete				
4	Concrete 2				
5	Concrete 3				
6	Concrete 4				
7	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 4: Concrete 2

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2304,2	kg m^-3		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	53700	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,18			
10	Bulk Modulus	2,7969E+10	Pa		
11	Shear Modulus	2,2754E+10	Pa		
12	Tensile Yield Strength	0	Pa		
13	Compressive Yield Strength	0	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5	MPa		
15	Compressive Ultimate Strength	222,72	MPa		
16	Isotropic Thermal Conductivity	0,72	W m^-1 ...		
17	Specific Heat, C _p	780	J kg^-1 C...		

Properties of Outline Row 5: Concrete 3

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2294,2	kg m^-3		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	48540	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,18			
10	Bulk Modulus	2,5281E+10	Pa		
11	Shear Modulus	2,0568E+10	Pa		
12	Tensile Yield Strength	0	Pa		
13	Compressive Yield Strength	0	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5	MPa		
15	Compressive Ultimate Strength	194,44	MPa		
16	Isotropic Thermal Conductivity	0,72	W m^-1 ...		
17	Specific Heat, C _p	780	J kg^-1 C...		

B)

Г)

Outline of Schematic A2: Engineering Data

	A	B	C	D	E
1	Contents of Engineering Data			Source	Description
2	Material				
3	Concrete				
4	Concrete 2				
5	Concrete 3				
6	Concrete 4				
7	Structural Steel				Fatigue Data at zero mean stress comes from 1998 ASME BPV Code, Section 8, Div 2, Table 5-110.1
*	Click here to add a new material				

Properties of Outline Row 6: Concrete 4

	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Material Field Variables	Table			
3	Density	2291,8	kg m^-3		
4	Isotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
6	Isotropic Elasticity				
7	Derive from	Young's M...			
8	Young's Modulus	4784	MPa		
9	Poisson's Ratio	0,18			
10	Bulk Modulus	2,4917E+09	Pa		
11	Shear Modulus	2,0271E+09	Pa		
12	Tensile Yield Strength	0	Pa		
13	Compressive Yield Strength	0	Pa		
14	Tensile Ultimate Strength	5	MPa		
15	Compressive Ultimate Strength	174,18	MPa		
16	Isotropic Thermal Conductivity	0,72	W m^-1 C...		
17	Specific Heat, C _p	780	J kg^-1 C...		

Д)

Рисунок 5.3 – Механические свойства арматуры (а) и бетона (б-д)

3. Формирование конечно-элементной сетки. Для моделирования элементов конструкции методом конечных элементов выполняется дискретизация расчетной области, представляющая собой процесс ее разбиения на конечное число малых элементов (рисунок 5.4).

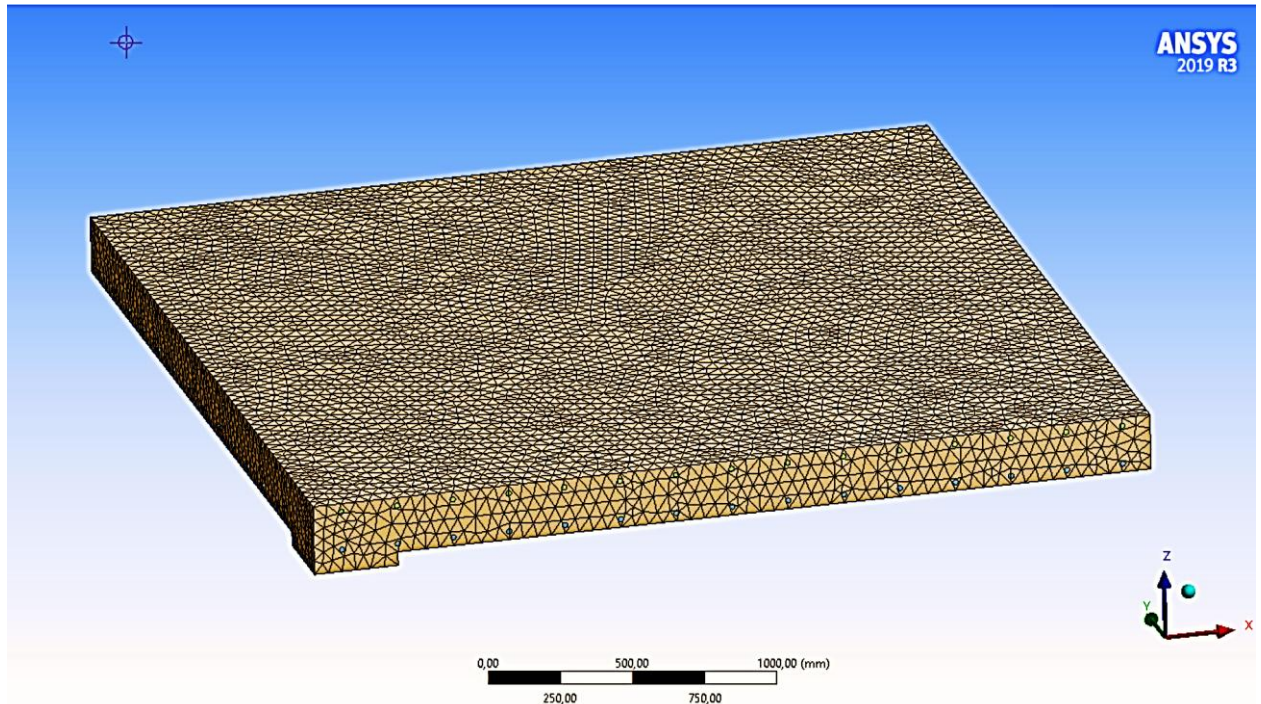


Рисунок 5.4 – Сетка конечных элементов

4. Задание граничных условий и нагрузок. На расчетную модель накладываются граничные условия, соответствующие жёсткой фиксации опор, моделирующих колонны. Для моделирования воздействий на конструкцию учитываются следующие виды нагрузок (рисунок 5.5):

1. Постоянные нагрузки: учитывается только собственный вес элементов конструкции, без учёта веса отделочных материалов и инженерных коммуникаций, так как на данном этапе проектирования они не рассматриваются.

2. Временные нагрузки: рассматриваются эксплуатационные нагрузки, возникающие в процессе использования конструкции, включая вес людей и мебели. Величина этих нагрузок составляет $3,0 \text{ кН/м}^2$.

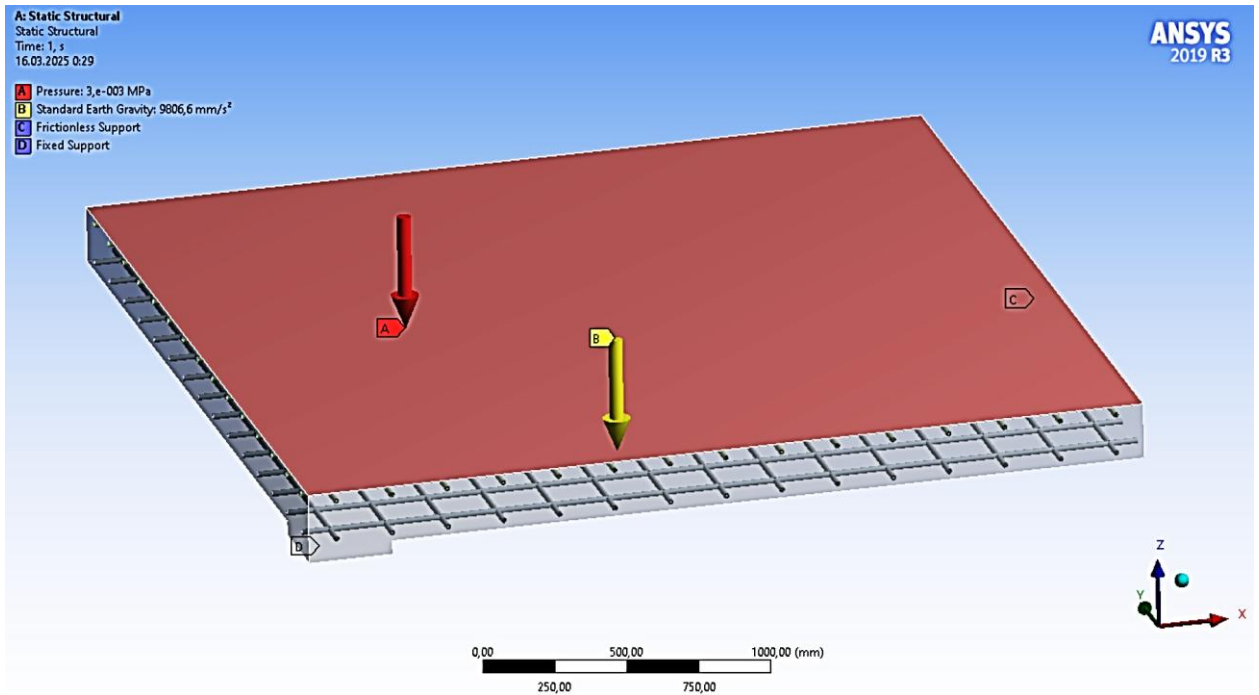


Рисунок 5.6 – Нагрузки и закрепления:

A – эксплуатационные нагрузки (люди, мебель)

B – собственный вес конструкции

C – симметричные граничные условия по плоскостям симметрии (frictionless support)

D – жесткое закрепление по основанию колонны

5. Расчет напряженно-деформированного состояния конструкции.

Целью данного этапа является определение прочности и жёсткости элементов конструкции, что является ключевым аспектом обеспечения их надёжности.

Расчёт элементов конструкций выполнен с учётом требований строительных норм и правил. В соответствии со СНиП 2.03.01–84 (СП 63.13330.2012), допустимые значения прогибов перекрытий зданий с плоскими потолками зависят от длины пролёта (l). Для пролётов длиной менее 6 метров допустимый прогиб составляет $l/200$; от 6 до 7,5 метров – 3 см; более 7,5 метров – $l/250$.

Допустимые значения напряжений в конструктивных элементах приняты в соответствии с используемыми материалами и коэффициентами запаса прочности.

Для численного моделирования бетонных конструкций используют объемные конечные элементы типа SOLID185, позволяющие учитывать нелинейное поведение материала под воздействием нагрузки. Механические

характеристики бетона задаются такими параметрами, как предел прочности на сжатие и растяжение, модуль упругости, коэффициент Пуассона и плотность.

Арматурные стержни моделируются с использованием линейных конечных элементов типа BEAM188, которые учитывают осевую жесткость. Сечение арматуры определяется ее диаметром.

Для моделирования совместной работы бетона и арматуры применяется метод дискретного армирования, реализованный с помощью элементов типа REINF264. Этот подход позволяет избежать необходимости совмещения узлов армирующих элементов с узлами базовых элементов бетона, что существенно упрощает процесс моделирования. Перед преобразованием арматуры в элементы REINF264 ее расположение и ориентацию предварительно задают с использованием временных элементов типа MESH200.

Для автоматизации процесса моделирования и выполнения расчётов в программном комплексе ANSYS используется модуль APDL (ANSYS Parametric Design Language), обеспечивающий гибкую настройку параметров модели и автоматизацию процесса постобработки результатов.

5.2. Расчет несущей способности плиты перекрытия, выполненной с использованием разработанных составов бетона

Расчетная модель перекрытия представлена объёмной пластиной размерами 6000х6000 мм и толщиной 200 мм. Арматура выполнена в виде стальной сетки с шагом 200 мм, расположенной в два слоя на расстоянии 30 мм от верхней и нижней границы перекрытия. Опирается перекрытие осуществляется на колонны, расположенные по углам конструкции.

В результате численного моделирования были определены матрицы распределения основных параметров напряженно-деформированного состояния плиты перекрытия, включая напряжения, перемещения и деформации. Эти данные представлены на рисунках 5.6–5.10 и иллюстрируют распределение исследуемых параметров по площади плиты.

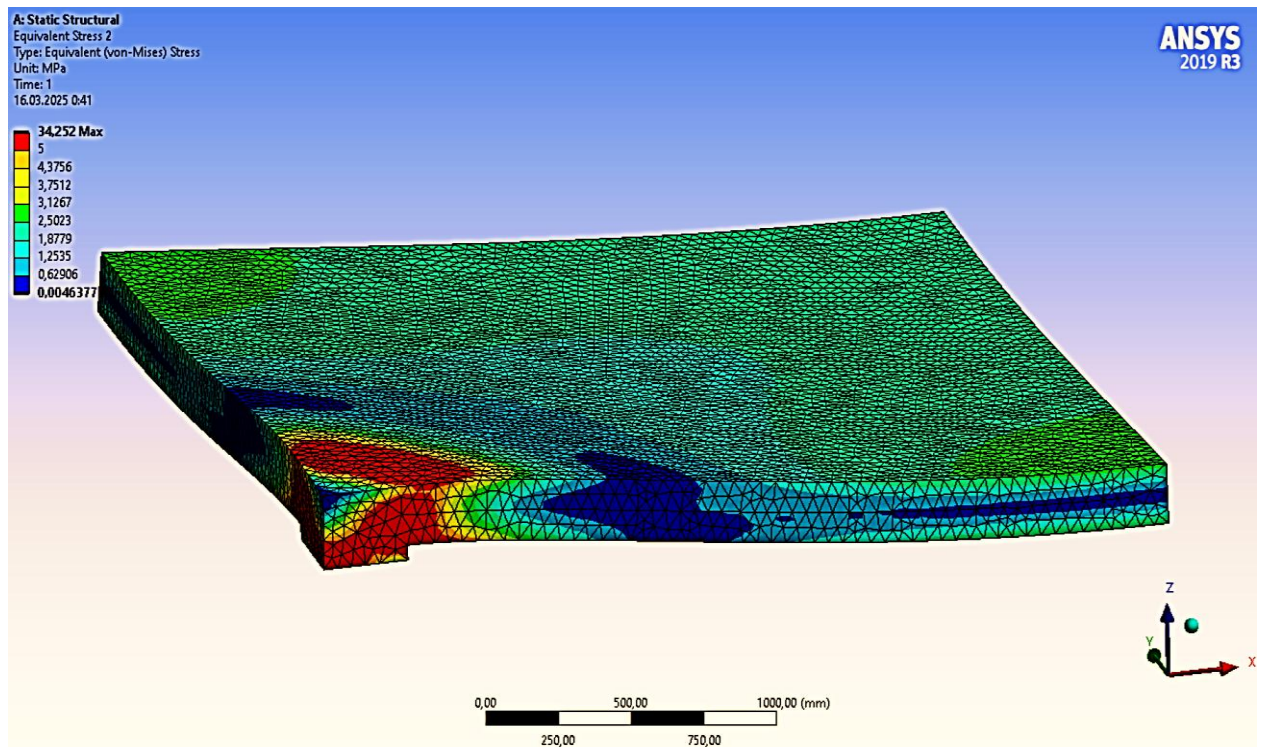


Рисунок 5.6 – Эквивалентные напряжения в бетоне

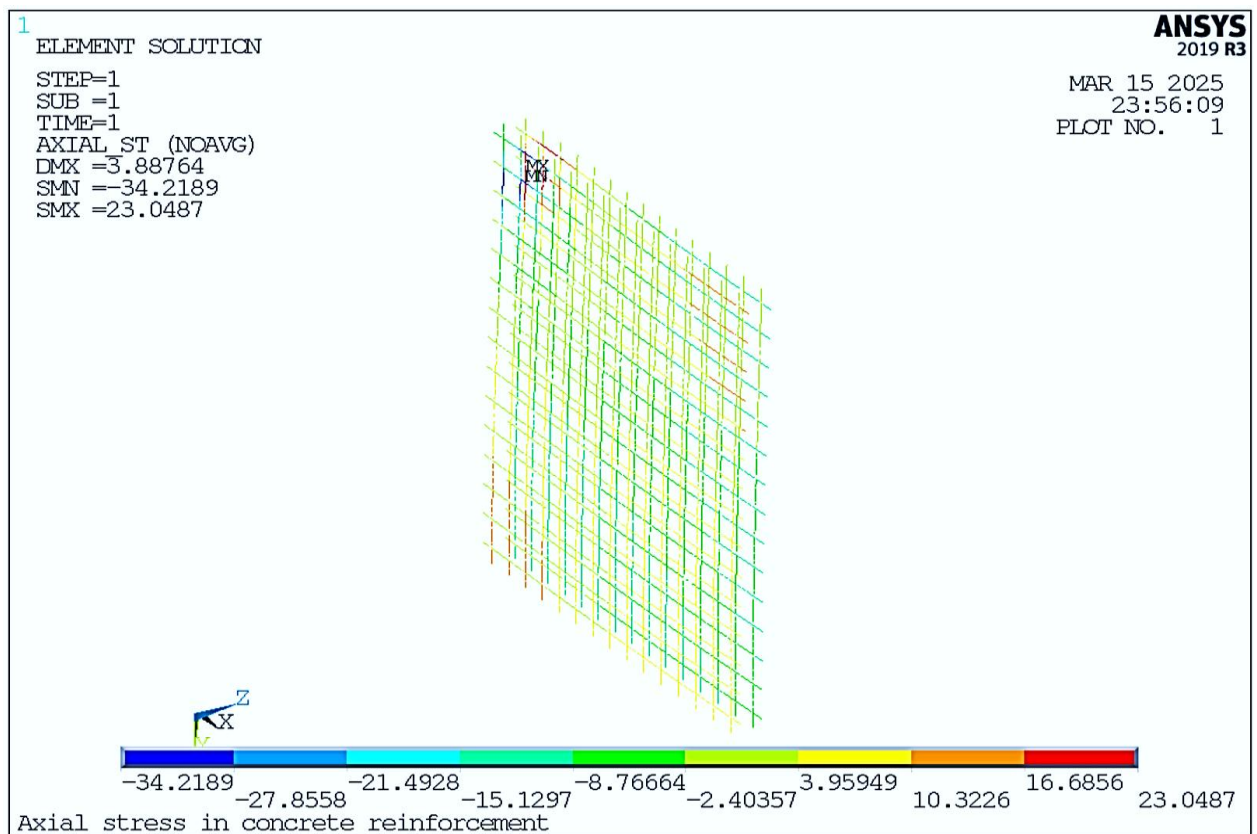


Рисунок 5.7 – Осевые напряжения в арматуре

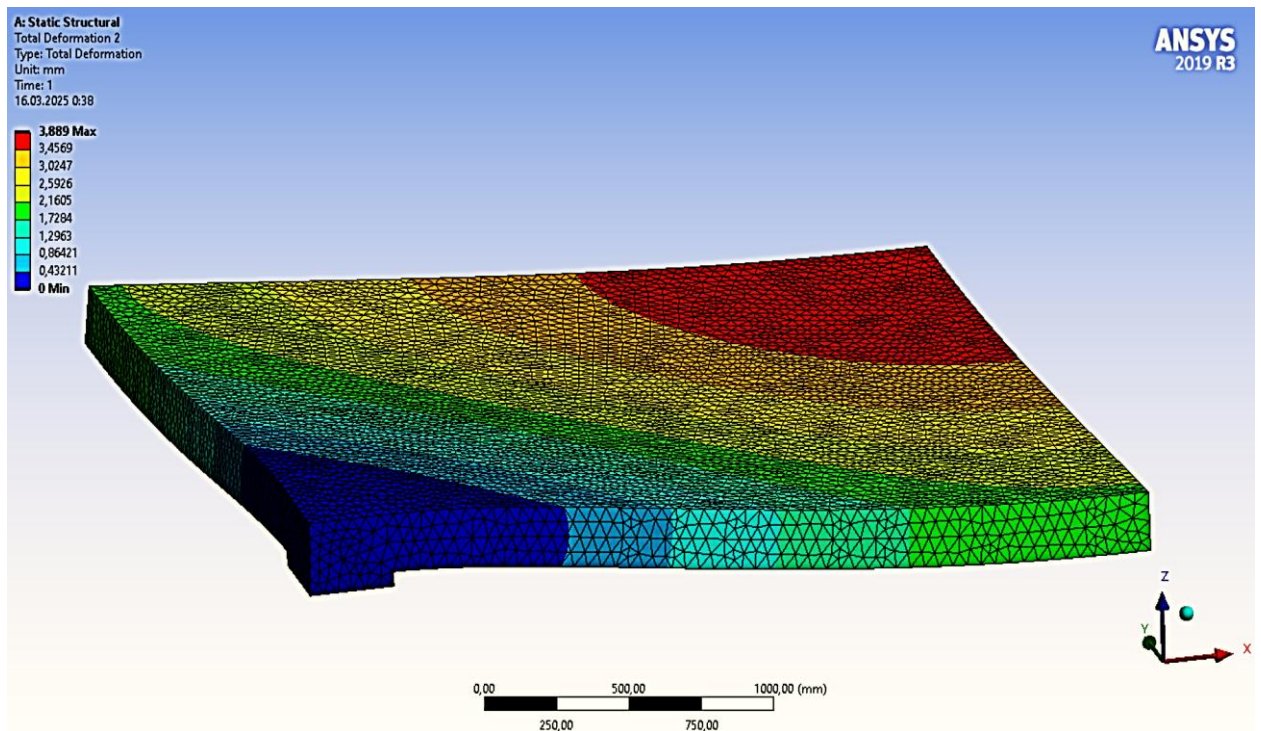


Рисунок 5.8 – Результирующие перемещения и деформации в плите перекрытия при изгибе

Для выявления критических зон конструкции выполнен расчет минимальных и максимальных главных напряжений, результаты которого визуализированы на рисунках 5.9 – 5.10.

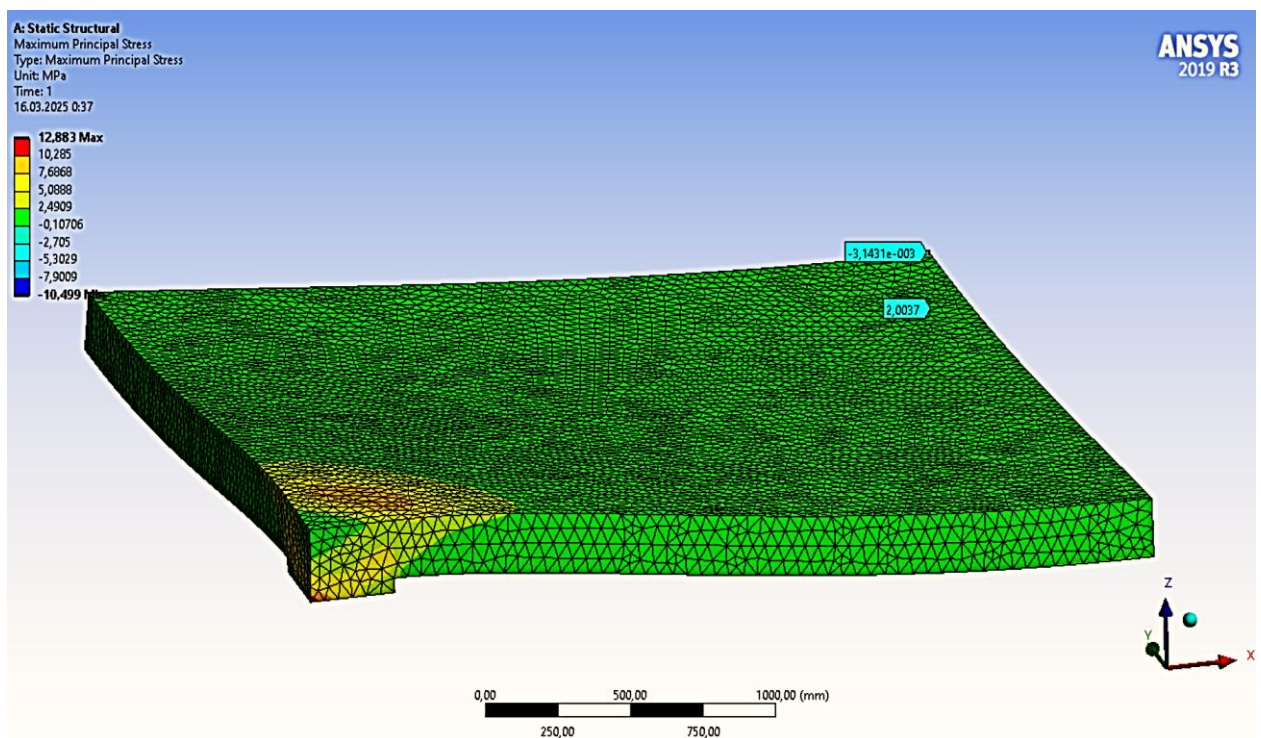


Рисунок 5.9 – Главные максимальные напряжения в плите перекрытия

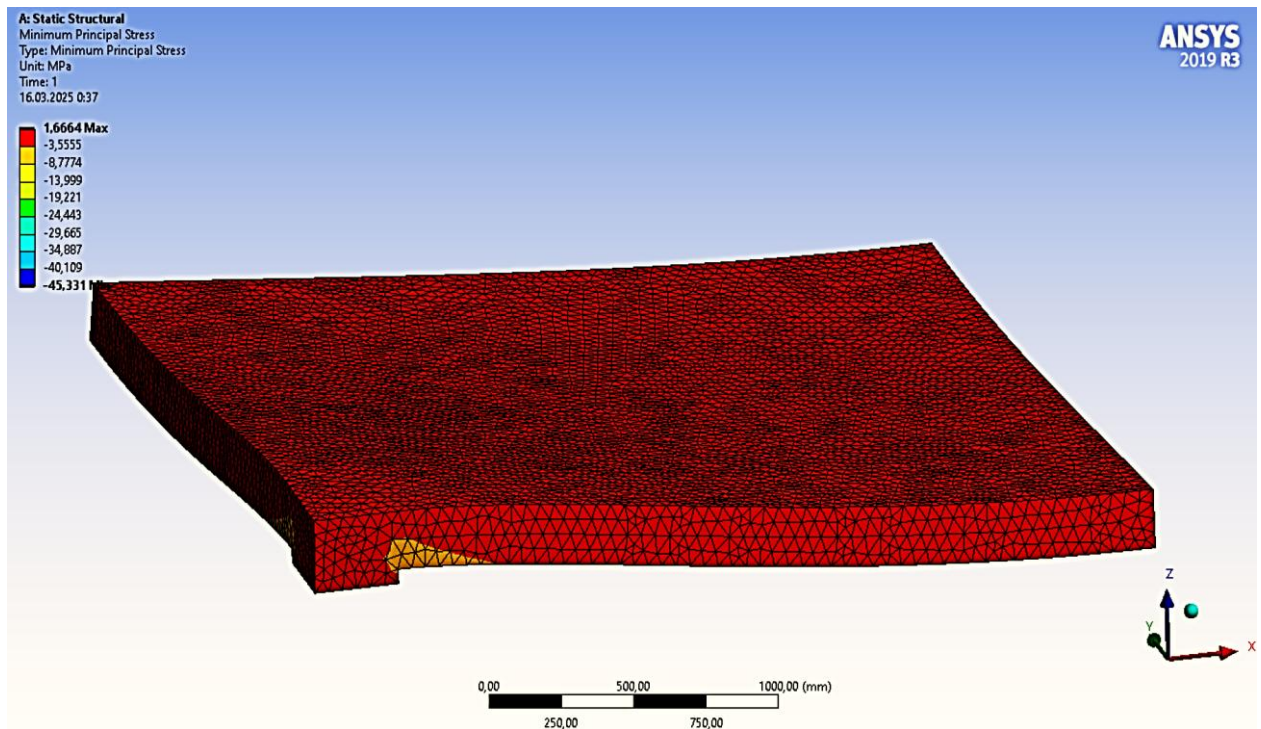


Рисунок 5.10 – Главные минимальные напряжения в плите перекрытия

Для определения оптимальных параметров плиты перекрытия проведено численное моделирование для четырех вариантов бетона: контрольного образца и трех типов разработанных бетонов, содержащих ДП. В рамках расчетов варьировались такие параметры, как толщина плиты, диаметр и шаг арматурных стержней. Результаты расчетов напряжений и максимальных прогибов плиты представлены в таблицах 5.3–5.6.

Таблица 5.3 – Эквивалентные напряжения в центре перекрытия; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	2,19	2,48	2,89	3,46	4,35
Бетон №1	2,37	2,66	3,10	3,70	4,62
Бетон №2	2,36	2,64	2,07	3,67	4,56
Бетон №3	2,33	2,63	3,06	3,67	4,55

Допустимые значения эквивалентных напряжений для бетона регламентируются расчетным сопротивлением на сжатие в соответствии с СП 63.13330.2018. Анализ таблицы 5.3 показал, что значения эквивалентных напряжений в центральной части перекрытия не превышают 4,56 МПа, что

существенно ниже соответствующих расчетных сопротивлений бетона на сжатие (R_b) и соответствует требованиям пункта 5.3 СП 63.13330.2018.

В соответствии с требованиями СНиП 2.03.01-84* (раздел «Прогибы и перемещения»), для пролётов длиной менее 6 метров максимальный допустимый прогиб не должен превышать значения, равного $l/200$, что составляет 30 мм для пролёта длиной 6 метров.

Анализ данных, представленных в таблице 5.4, показывает, что при толщине перекрытия в диапазоне от 120 до 200 мм значения прогиба находятся в пределах допустимых норм, установленных в пункте 4.4 СНиП 2.03.01-84*.

Таблица 5.4 – Максимальный прогиб плиты перекрытия; мм

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	3,89	4,87	6,31	8,59	12,40
Бетон №1	2,30	2,88	3,74	5,06	7,29
Бетон №2	2,53	3,16	4,10	5,56	7,23
Бетон №3	2,56	3,20	4,15	5,63	8,04

Максимальные главные напряжения, представленные в таблице 5.5, сопоставимы с расчетным пределом прочности бетона на растяжение, определенным в соответствии с приложением Г (пункт Г.1) СП 63.13330.2018.

Таблица 5.5 – Главные максимальные напряжения плиты перекрытия; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	2,00	2,05	2,39	3,18	3,91
Бетон №1	1,92	2,24	2,82	3,21	3,72
Бетон №2	2,07	2,32	2,67	3,37	4,19
Бетон №3	2,00	2,24	2,65	3,19	4,26

Анализ минимальных главных напряжений (табл. 5.6), соответствующих зонам сжатия в бетонном теле, показал, что наибольшее сжимающее напряжение составляет $-4,56$ МПа. Данное значение значительно ниже предела прочности на сжатие для всех исследованных типов бетона (табл. 5.1).

Таблица 5.6 – Главные минимальные напряжения в плите перекрытия; МПа

Марка бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон 0	-2,19	-2,49	-2,89	-3,47	-4,34
Бетон 1	-2,37	-2,67	-3,06	-3,71	-4,63
Бетон 2	-2,36	-2,64	-3,02	-3,68	-4,56
Бетон 3	-2,36	-2,64	-3,06	-3,55	-4,56

На основании проведенных расчетов можно сделать вывод о целесообразности уменьшения толщины плиты перекрытия с 200 до 160 мм без нарушения требований прочности и безопасности. Повышенная прочность модифицированного бетона способствует более эффективному сопротивлению как растягивающим, так и сжимающим нагрузкам, подтверждая его высокую несущую способность. При толщине плиты перекрытия 160 мм для всех типов бетона максимальные напряжения остаются в рамках допустимых значений, регламентированных нормативными документами.

Исследуемые бетоны обеспечивают соответствие нормативным требованиям по жесткости. При толщине плиты перекрытия 160 мм величина прогибов не превышает предельно допустимых значений, установленных СНиП 2.03.01-84.

5.2.1. Анализ несущей способности железобетонной плиты перекрытия при использовании арматуры диаметром 16 мм и 18 мм

В рамках исследования проведен анализ несущей способности железобетонной плиты перекрытия при использовании арматурных стержней различного диаметра. В частности, были рассмотрены плиты, армированные стержнями диаметром 18 мм и 16 мм, при различных значениях толщины конструкции.

Целью исследования являлось определение минимально допустимых толщин плит перекрытия, обеспечивающих требуемую прочность и устойчивость под действием эксплуатационных нагрузок.

Проведена оценка прочностных и деформационных характеристик плит перекрытия при различной толщине конструкций, варьирующейся в диапазоне от 200 до 120 мм с шагом 20 мм. Расчеты выполнены для двух диаметров арматурных стержней при постоянных условиях нагружения и неизменных характеристиках используемых материалов.

Результаты расчётов представлены в таблицах 5.7–5.14. Анализ полученных данных позволил выявить оптимальные параметры армирования и толщины плиты, обеспечивающие требуемую несущую способность при заданных условиях эксплуатации.

Расчет напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты перекрытия с армированием стержнями диаметром 18 мм

Таблица 5.7 – Эквивалентные напряжения в центре перекрытия; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	2,00	2,32	2,88	2,94	4,19
Бетон №1	2,35	2,66	2,85	3,17	4,31
Бетон №2	1,95	2,23	2,77	3,41	4,31
Бетон №3	2,33	2,36	2,78	3,42	4,34

Таблица 5.8 – Максимальный прогиб; мм

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	3,91	4,88	6,33	8,59	12,39
Бетон №1	2,30	2,87	3,72	5,04	7,24
Бетон №2	2,53	3,16	4,09	5,54	7,96
Бетон №3	2,56	3,20	4,14	5,64	8,07

Таблица 5.9 – Главные максимальные напряжения; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	1,91	2,15	2,59	3,17	3,68
Бетон №1	2,13	2,27	2,89	3,44	4,31
Бетон №2	2,06	2,43	2,90	3,39	4,38
Бетон №3	2,04	2,46	2,48	3,29	4,38

Таблица 5.10 – Главные минимальные напряжения; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	-2,21	-2,51	-2,92	-3,5	-4,37
Бетон №1	-2,21	-2,63	-3,10	-3,28	-4,49
Бетон №2	-2,33	-2,60	-3,07	-3,67	-4,57
Бетон №3	-2,33	-2,64	-3,07	-3,67	-4,57

Расчет напряженно-деформированного состояния железобетонной плиты перекрытия с армированием стержнями диаметром 16 мм

Таблица 5.11 – Эквивалентные напряжения в центре перекрытия; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	2,12	2,53	2,94	3,45	4,39
Бетон №1	2,15	2,67	3,10	3,34	4,59
Бетон №2	2,34	2,65	3,01	3,67	4,51
Бетон №3	2,03	2,61	2,34	3,67	4,22

Таблица 5.12 – Максимальный прогиб; мм

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	3,93	4,90	6,36	8,62	12,40
Бетон №1	2,30	2,87	3,71	5,02	7,20
Бетон №2	2,53	3,16	4,08	5,23	7,93
Бетон №3	2,56	3,20	4,14	5,60	8,03

Таблица 5.13 – Главные максимальные напряжения; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	2,04	2,27	2,77	3,16	4,17
Бетон №1	1,89	2,47	2,46	3,20	3,89
Бетон №2	2,13	2,44	2,77	3,44	4,31
Бетон №3	2,12	2,43	2,87	3,41	3,78

Таблица 5.14 – Главные минимальные напряжения; МПа

Тип бетона	Толщина перекрытия, мм				
	200	180	160	140	120
Бетон №0	-2,24	-2,53	-2,95	-3,52	-4,25
Бетон №1	-2,36	-2,67	-2,96	-3,70	-4,59
Бетон №2	-2,34	-2,54	-2,82	-3,33	-4,56
Бетон №3	-2,34	-2,65	-3,07	-3,67	-4,56

Анализ результатов численного моделирования железобетонной плиты перекрытия с различными вариантами армирования

Анализ результатов численного моделирования (табл. 5.7–5.14) показал, что уменьшение диаметра арматуры с 20 до 18 и 16 мм приводит к умеренному росту эквивалентных напряжений во всех рассмотренных вариантах. При толщине перекрытия 160–200 мм различие в значениях напряжений между вариантами с арматурой диаметром 16 и 18 мм незначительно. При уменьшении толщины перекрытия до 120–140 мм разница между вышеуказанными вариантами исполнения увеличивается до 5–7%. При этом значения эквивалентных напряжений остаются ниже расчётного сопротивления бетона на сжатие во всех рассмотренных случаях.

С уменьшением толщины перекрытия и диаметра арматуры наблюдается увеличение прогиба, наиболее выраженное при толщине менее 140 мм. При толщине 160 мм и более прогибы соответствуют нормативным требованиям СП 20.13330.2016.

Анализ главных напряжений показывает, что для толщин перекрытия в диапазоне 160–200 мм различия между вариантами с арматурой диаметром 16 и 18 мм незначительны. Однако при уменьшении толщины перекрытия до 140 мм и менее разница становится более выраженной, что свидетельствует о росте локальных напряжений и повышении риска трещинообразования.

На основании проведённого анализа можно сделать следующие выводы.

Снижение диаметра арматуры с 20 до 18 и 16 мм в диапазоне толщин перекрытия от 160 до 200 мм приводит к незначительному увеличению напряжений и прогибов, остающихся при этом в пределах допустимых нормативных требований.

Разница в результатах расчётов напряженно-деформированного состояния для арматуры диаметром 18 и 16 мм при толщине перекрытия 160 мм и более укладывается в диапазон допустимой погрешности численного метода конечных элементов, что позволяет считать оба варианта армирования равнозначными с точки зрения эксплуатационной надёжности конструкции.

Минимально допустимая толщина перекрытия для арматуры диаметром 16 мм составляет 160 мм. Данные параметры обеспечивают соответствие конструкции требованиям прочности, жёсткости и трещиностойкости.

На основании проведённых расчётов плиты перекрытия установлено, что при соблюдении нормативных требований к плотности армирования, толщине защитного слоя и корректной схеме опирания, возможно уменьшение толщины плиты, выполненной с применением разработанных составов модифицированного бетона, с 200 мм до 160 мм при использовании арматуры диаметром 16 мм вместо исходных 20 мм. При этом надёжность и эксплуатационные характеристики конструкции сохраняются на прежнем уровне.

5.3. Расчет несущей способности колонны, изготовленной с применением модифицированного бетона

Расчётная модель колонны представлена четырехугольным призматическим стержнем поперечным сечением 350х350мм и высотой 3900мм, армированным продольной арматурой, расположенной в углах сечения на расстоянии 50 мм от граней колонны.

Целью данной части работы является оценка прочности колонны при различных типах бетона, размерах сечения и плотности армирования. В качестве нагрузки рассматривается внецентренное сжатие, соответствующее расчётной нагрузке на нижнюю колонну, составляющей 15 тонн на одну опору [348].

Согласно СП 22.13330.2016, для несущих конструкций нормативные значения просадки устанавливаются на основе расчётов по второй группе предельных состояний, учитывающих деформации, влияющие на эксплуатационные характеристики сооружения.

Допустимые отклонения для железобетонных колонн приведены в таблице 5.15.

Таблица 5.15 – Допустимые отклонения железобетонных колонн

Отклонение от вертикали	не более 12 мм (для колонн высотой до 5 м)
Искривление ствола	не более 1/200 высоты колонны

Результаты численного моделирования представлены на рисунках 5.11 – 5.12 для конкретного случая и в таблицах 5.16 – 5.19 для различных размеров колонн и типов бетона.

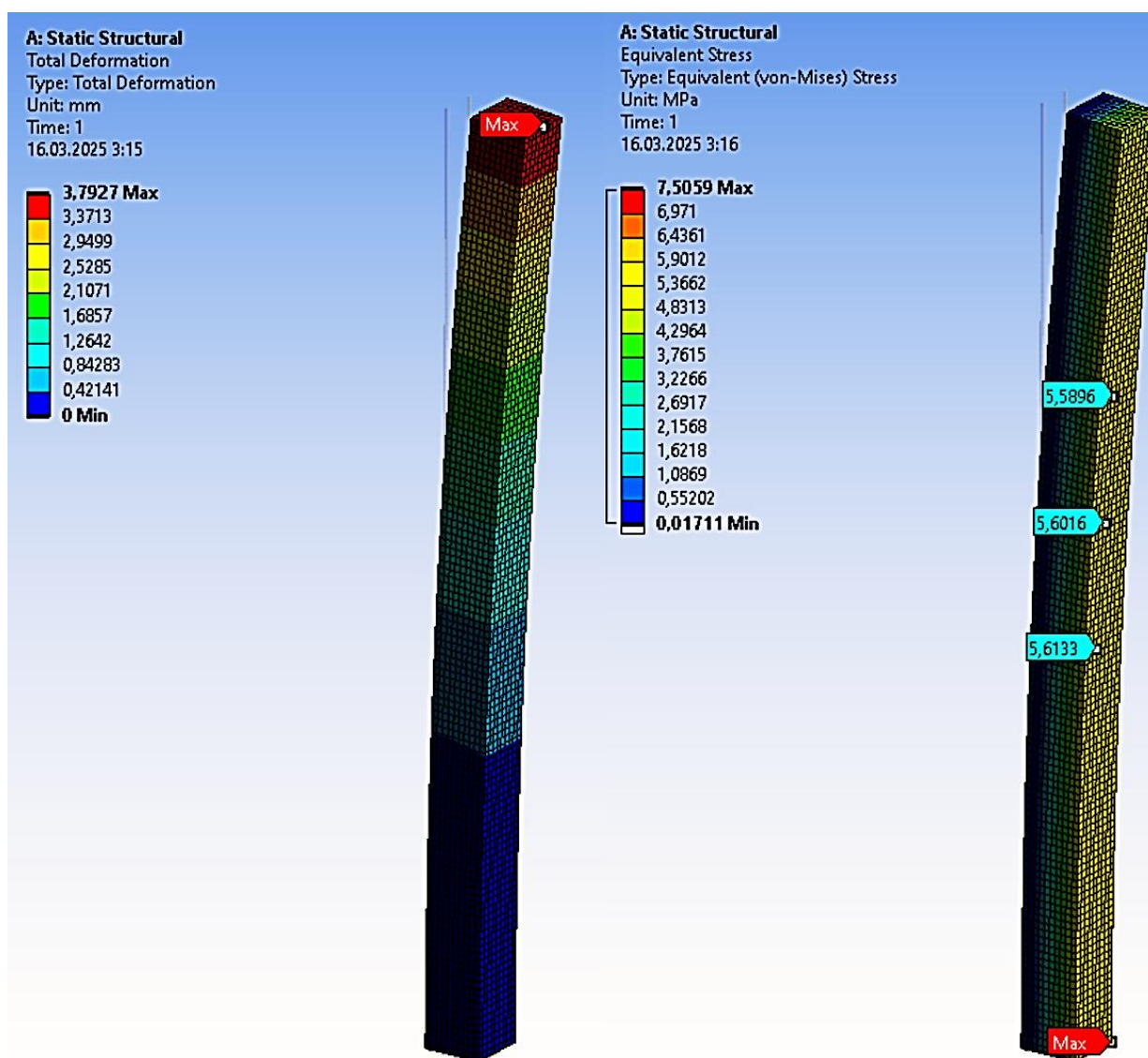


Рисунок 5.12. Максимальные прогибы и эквивалентные напряжения колонн

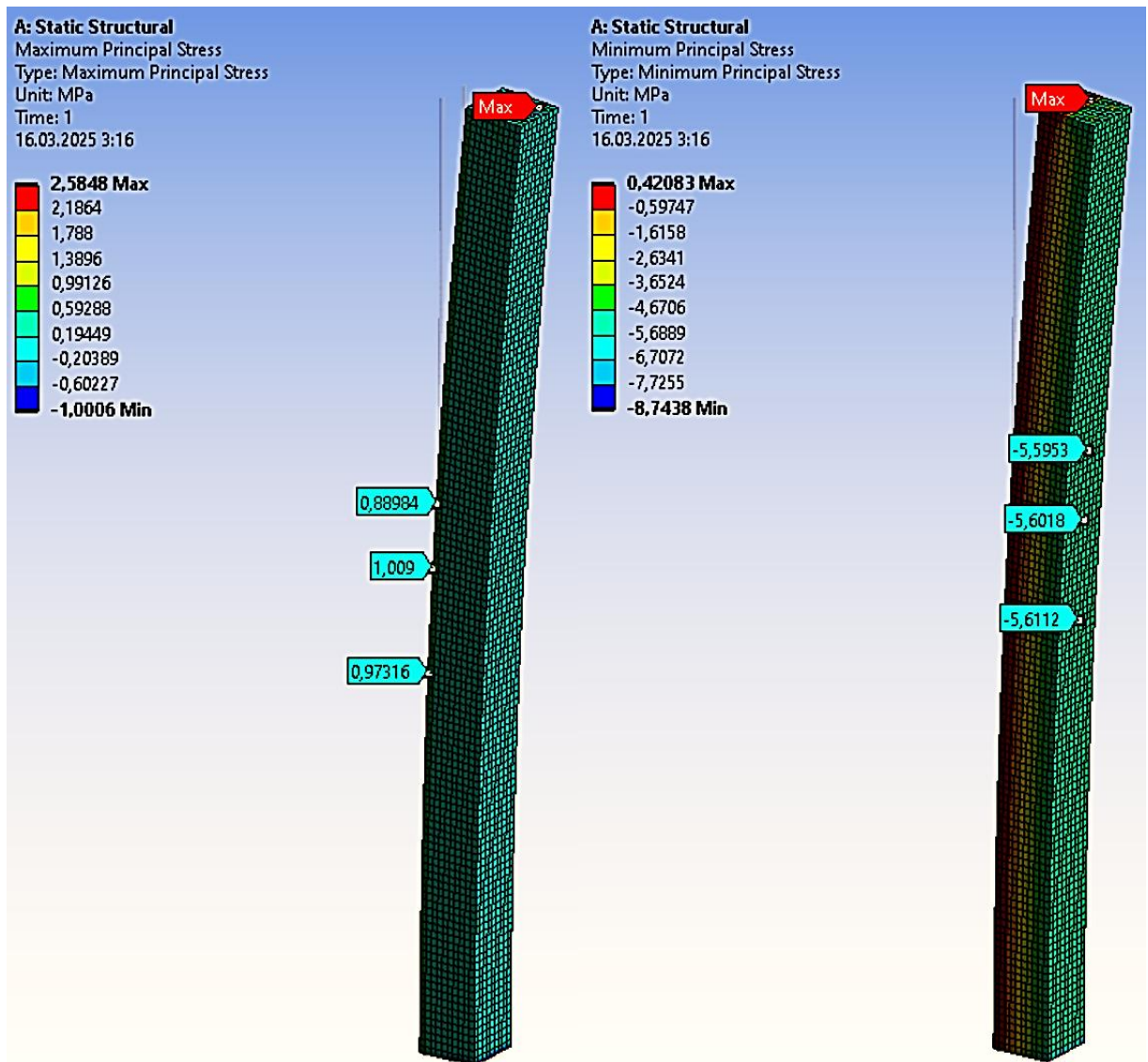


Рисунок 5.12. Максимальные и минимальные главные напряжения колонн

Таблица 5.16 – Эквивалентные напряжения в колонне; МПа

Тип бетона	Размер поперечного сечения колонны, мм				
	350x350	300x300	250x250	200x200	150x150
Бетон №0	2,85	3,78	5,30	8,00	13,79
Бетон №1	2,96	3,96	5,61	8,58	14,92
Бетон №2	2,95	3,94	5,56	8,49	14,75
Бетон №3	2,93	3,94	5,55	8,48	14,73

Результаты численного моделирования, представленные в таблице 5.16, показали, что в колоннах сечением 300×300 мм, изготовленных с применением модифицированных составов бетона, эквивалентные напряжения находятся в диапазоне 3,94–3,96 МПа. Максимальные значения эквивалентных напряжений, зафиксированные в таблице, не превышают расчетное

сопротивление бетона на сжатие (табл. 5.1 СП 63.13330.2018) для всех исследуемых типов бетона, что свидетельствует о соответствии конструкций нормативным требованиям.

Результаты анализа прогибов для всех типов исследуемых бетонов, представленные в таблице 5.17, демонстрируют, что они соответствуют нормативным требованиям СП 22.13330.2016 (пункт 10.6), согласно которым максимальный допустимый прогиб для колонн высотой до 5 метров не должен превышать 12 мм.

Таблица 5.17 – Максимальный прогиб колонны; мм

Тип бетона	Размер поперечного сечения колонны, мм				
	350x350	300x300	250x250	200x200	150x150
Бетон №0	2,43	3,79	6,41	12,36	30,11
Бетон №1	1,42	2,24	3,79	7,35	17,68
Бетон №2	1,56	2,44	4,16	8,06	19,43
Бетон №3	1,58	2,48	4,22	8,17	19,69

Анализ максимальных напряжений в конструкции (табл. 5.18) показал, что их значения не превышают расчётного сопротивления бетона на осевое растяжение, определённого в соответствии с Приложением Г СП 63.13330.2018.

При расчёте главных максимальных напряжений для колонны прямоугольного сечения 300×300 мм установлено, что все полученные значения значительно ниже расчётного сопротивления бетона на растяжение. Это подтверждает соответствие конструкции колонны требованиям безопасности и ее способность выдерживать эксплуатационные нагрузки без риска разрушения для всех исследуемых типов бетона.

Таблица 5.18 – Главные максимальные напряжения в колонне; МПа

Тип бетона	Размер поперечного сечения колонны, мм				
	350x350	300x300	250x250	200x200	150x150
Бетон №0	0,47	0,58	0,84	1,67	3,69
Бетон №1	0,40	0,64	1,01	1,76	3,64
Бетон №2	0,46	0,66	1,00	1,73	3,66
Бетон №3	0,40	0,67	0,96	1,75	3,60

В рамках исследования были проанализированы главные минимальные напряжения в колонне (табл. 5.19), характеризующие напряженное состояние бетона в зонах сжатия. Полученные значения напряжений существенно ниже расчетного сопротивления бетона на сжатие, что свидетельствует о достаточной прочности конструкции в зонах сжатия.

Таблица 5.19 – Главные минимальные напряжения в колонне; МПа

Тип бетона	Размер поперечного сечения колонны, мм				
	350x350	300x300	250x250	200x200	150x150
Бетон №0	-2,85	-3,78	-5,31	8,00	-13,79
Бетон №1	-2,96	-3,96	-5,61	-8,57	-14,91
Бетон №2	-2,94	-3,94	-5,55	-8,49	-14,74
Бетон №3	-2,94	-3,94	-5,55	-8,48	-14,73

Для колонны сечением 300×300 мм, усиленной арматурными стержнями диаметром 20 мм, расчетные значения эквивалентных напряжений, прогибов и главных напряжений находятся в пределах нормативных значений при использовании всех типов разработанного бетона. Конструкция колонны соответствует требованиям СП 63.13330.2018, что подтверждает ее способность выдерживать допустимые сжимающие нагрузки.

Анализ напряженно-деформированного состояния колонны сечением 300×300 мм с армированием стержнями диаметром 16 и 18 мм

Выполнен численный анализ напряжённо-деформированного состояния железобетонной колонны прямоугольного сечения 300×300 мм при использовании в конструкции арматурных стержней диаметром 16 и 18 мм. Расчёт выполнен в программном комплексе ANSYS с применением элементов REINF264 для моделирования арматурных стержней и SOLID185 для моделирования бетонного массива. Результаты численного моделирования (табл. 5.20) демонстрируют, что использование арматуры диаметром 18 мм приводит к незначительному увеличению напряжений и прогибов по сравнению с вариантом арматуры диаметром 20 мм. Разница составляет не более 3–5%. Все полученные значения соответствуют требованиям СП

63.13330.2018 и СП 22.13330.2016. Таким образом, применение арматуры диаметром 18 мм является допустимым для всех типов исследуемых бетонов.

Таблица 5.20 – Расчёт напряженно-деформированного состояния колонны сечением 300×300 мм при диаметре арматуры Ø18 мм

Тип бетона	Эквивалентные напряжения (МПа)	Максимальный прогиб (мм)	Главные максимальные напряжения (МПа)	Главные минимальные напряжения (МПа)
Бетон №0	5.33	6.48	0.87	-5.38
Бетон №1	4.00	2.27	0.66	-4.00
Бетон №2	3.94	2.44	0.68	-3.94
Бетон №3	3.92	2.48	0.69	-3.92

Также было установлено, что при использовании модифицированных бетонов возможно уменьшение размеров поперечного сечения колонны с 350х350 до 300х300 мм при уменьшении диаметра арматурных стержней с 20 мм до 18 мм без потери несущей способности конструкции.

5.4. Расчет экономической эффективности использования разработанных составов бетонов

Выполнен анализ экономической эффективности использования бетонов, модифицированных ДПСО. При этом учитывались как затраты на производство разработанных бетонных смесей, так и экономический эффект от оптимизации конструктивных решений, включая снижение толщины плит перекрытия, колонн и плотности армирующих элементов при сохранении их несущей способности.

Для оценки затрат на получение ДП была выбрана шаровая мельница модели GrindMill. Номинальная производительность данной установки составляет до 1200 кг/ч, потребляемая мощность — 15 кВт. Стоимость электроэнергии для промышленных предприятий принята по тарифу 8,4 рубля за 1 киловатт-час. На основании этих данных был выполнен расчет энергозатрат на производство 1 кг ДП, которые равняются приблизительно $15 \times 8,4 / 1200 = 0,105$ руб. Учитывая, что энергопотребление шаровых мельниц обычно составляет около 50% общей стоимости измельчённого материала

[349], можно определить ориентировочную стоимость полученных ДП:
 $0,105/0,5 = 0,2$ руб./кг.

В таблице 5.21 приведены результаты расчета стоимости бетона в зависимости от содержания модифицирующей добавки (ДП) в его составе. Исходная стоимость бетона без добавления ДП составляет 8411 руб./м³. Введение 20% ДП от массы цемента приводит к снижению стоимости бетона на 580 руб./м³, что составляет 7% от первоначальной стоимости.

Таблица 5.21 – Расчет стоимости 1 м³ бетона с добавлением ДП по сравнению с исходным вариантом

Тип бетона	Компоненты бетона	Стоимость 1 кг, руб.	Расход, кг/м ³	Стоимость материала руб./м ³
Контрольный образец	Цемент (портландцемент)	7,7	420	3234
	Песок карьерный	1,8 (1 т -1800 руб.)	690	1242
	Щебень	3,5 (1 т – 3500 руб.)	1100	3850
	Вода	0,05 (1 м ³ – 49,83 руб.)	170	8,5
ИТОГО				8411
Бетон с добавлением 20% ДПСО	ДПСО	0,2	84	16,8
	Цемент (портландцемент)	7,7	336	2587
	Песок карьерный	1,8 (1 т 1800 руб.)	653	1175
	Щебень	3,5 (1 т – 3500 руб.)	1127	3944
	Вода	0,05 (1 м ³ – 49,83 руб.)	170	8,5
ИТОГО				7831

Выполнен сравнительный расчет стоимости плиты перекрытия и колонны, изготовленных из модифицированных бетонных составов, при условии уменьшения их толщины и плотности армирования (табл. 5.22). Результаты расчета показали, что итоговая стоимость плиты перекрытия

снизилась на 33%, а стоимость колонны – на 24,5% по сравнению с базовым вариантом.

Таблица 5.22 – 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

5.5. Выводы по главе

1. Численный анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных строительных конструкций, выполненных с использованием разработанных составов бетона, выявил существенное повышение прочности конструкции по сравнению с базовыми материалами. Модифицирование бетона ДПСО привело к фактическому увеличению его класса прочности с В30 до В50.

2. Результаты численного моделирования показали, что повышение класса прочности бетона позволяет уменьшить толщину плиты перекрытия с исходных 200 до 160 мм, сечение колонны – с 350 до 300 мм. При этом обеспечивается сохранение надежности и эксплуатационных характеристик строительной конструкции.

3. На основании численного моделирования железобетонных конструкций выполнен расчёт необходимого количества арматуры для плиты

перекрытия и колонны в соответствии с нормативными требованиями. Анализ расчетных данных показал, что использование разработанных составов бетона позволяет уменьшить диаметр арматурных стержней с 20 до 16 мм при армировании плиты перекрытия и до 18 мм для усиления колонны. Это позволяет снизить степень армирования в указанных строительных элементах на 20 и 48%, соответственно, по сравнению со стандартным проектом. При этом несущая способность конструкций остаётся не ниже, чем в базовом варианте исполнения.

4. Анализ технико-экономических расчётов показывает, что при использовании модифицированных составов бетона себестоимость плиты перекрытия уменьшается на 33 %, колонны – на 24,5 % по сравнению с типовой конструкцией.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основании анализа научной литературы определена цель диссертационного исследования, которая заключается в изучении влияния дисперсных добавок на основе отходов строительной промышленности на механические характеристики бетонных композиций.

2. Теоретически обоснован выбор природы и размеров компонентов для модифицирования бетонной смеси с целью повышения эксплуатационных характеристик бетона. Проведено исследование химического и гранулометрического составов ДП и УДП строительных отходов. Установлены потенциальные возможности их применения в качестве модифицирующих компонентов бетонной смеси.

3. На основе гранулометрического анализа ДП строительных отходов проведена оценка эффективности процессов формирования ДП и УДП при измельчения материалов.

4. В рамках подготовки модификаторов бетонной смеси изучена кинетика измельчения отходов строительного производства. Установлена кинетическая зависимость степени диспергирования строительных отходов от времени измельчения. Установлено, что константа скорости измельчения варьируется в диапазоне от 0,0011 до 0,003 мин⁻¹ в зависимости от параметров процесса. Показано, что закономерности измельчения имеют общий характер для всех исследованных материалов, что подтверждает их применимость к различным типам строительных отходов.

5. Определены оптимальные параметры измельчения для получения частиц с высокой степенью дисперсности. В качестве критерия оптимизации выбран выход фракции $-0,026 + 0$ мм. Предложена эмпирическая зависимость эффективности измельчения от регулируемых параметров технологии. Установлено, что наиболее значимыми технологическим параметром является скорость вращения мельницы. Показано, что оптимальные значения регулируемых параметров обеспечивают выход фракции $-0,026 + 0$ мм в количестве 77-78% от загруженного материала.

6. Разработаны составы бетонных смесей, содержащих в качестве специальной добавки дисперсные порошки отходов строительных кирпичей. Гранулометрический состав порошков охватывает диапазон $0,045+0,026$ мм, их содержание в смеси варьируется от 10 до 50 % от массы цемента.

7. Установлено, что введение ДП в бетонную смесь обеспечивает повышение прочности бетонов на сжатие на 13,9 – 59,8 % при содержании ДП в количестве 10–30 % от массы цемента, коэффициента упругости – на 55,27 – 88,0 % во всем диапазоне содержания ДП, по сравнению с контрольным образцом, изготовленным по классической технологии.

8. Доказано, что зависимости прочности на сжатие и модуля упругости бетонных образцов от содержания дисперсных порошков (ДП) могут быть аппроксимированы полиномиальной функцией третьей степени. Данные зависимости имеют аналогичный характер для всех исследованных образцов бетона, независимо от состава дисперсных добавок.

9. Показано, что наилучшие механические показатели бетона обеспечивает добавка к цементу 20 % ДП, повышая прочность на сжатие бетонных образцов на 46 – 59,8 %, коэффициент упругости – на 74 – 88 % по сравнению с контрольными значениями.

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

11. Расчётно-экспериментальным путём доказано, что применение бетона с добавкой ДПСО позволяет уменьшить толщину плиты перекрытия с 200 до 160 мм, сечение колонны – с 350 до 300 мм, массу рабочей арматуры на 24,5 % при сохранении надежности и эксплуатационных характеристик строительной конструкции. Экономический эффект от замены бетона класса В22,5 на модифицированный бетон с уменьшением степени армирования составит 33% от себестоимости металлоконструкции для плиты перекрытия и 25% для колонны.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.

1. Said, A. M. Properties of concrete incorporating nano-silica / A. M. Said, M. S. Zeidan, M. T. Bassuoni, Y. P. Tian // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 36. – P. 838–844. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044.
2. Chahal, N. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume / N. Chahal, R. Siddique, A. Rajor // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 37. – P. 645–651. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.029.
3. Jo, B. W. Investigations on the development of powder concrete with nano-SiO₂ particles / B. W. Jo, C. H. Kim, J. H. Lim // KSCE Journal of Civil Engineering. – 2007. – Vol. 11, no. 1. – P. 37–42. – DOI: 10.1007/BF02823370.
4. Zhang, P. Application of gray relational analysis for chloride permeability and freeze-thaw resistance of high-performance concrete containing nanoparticles / P. Zhang, C. Liu, Q. Li // Journal of Materials in Civil Engineering. – 2011. – Vol. 23, no. 12. – P. 1760–1763. – DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000332.
5. Ежов, В. Б. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / В. Б. Ежов. – Екатеринбург, 2014. – Текст : непосредственный.
6. Баженов, Ю. М. Технология бетона / Ю. М. Баженов. – Москва : Изд. АСВ, 2011. – Текст : непосредственный.
7. Ежов, В. Б. Технология бетона, строительных изделий и конструкций / В. Б. Ежов. – Екатеринбург, 2014. – Текст : непосредственный.
8. Neville, A. M. Properties of Concrete / A. M. Neville. – 4th ed. – 1996. – 844 p. – Текст : непосредственный.
9. Abdalla, A. N. Integration of energy storage system and renewable energy sources based on artificial intelligence: an overview / A. N. Abdalla, M. S. Nazir, H. Tao, S. Cao, R. Ji, M. Jiang, L. Yao // J. Energy Storage. – 2021. – Vol. 40. – P. 102811. – DOI: 10.1016/j.est.2021.102811.
10. Iea. Cement Technology Roadmap 2009 Carbon emissions reductions up to 2050; 2009. – Текст : непосредственный.

11. Mehta, P. K. Concrete technology for sustainable development / P. K. Mehta // ACI Mater J. – 1999. – P. 47–53. – Текст : непосредственный.
12. Noorvand, H. Incorporation of nano TiO₂ in black rice husk ash mortars / H. Noorvand, A. A. Abang Ali, R. Demirboga, N. Farzadnia, H. Noorvand // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 47. – P. 1350–1361. – Текст : непосредственный.
13. Chithra, S. The effect of colloidal nano-silica on workability, mechanical and durability properties of high-performance concrete with copper slag as partial fine aggregate / S. Chithra, S. R. R. Senthil Kumar, K. Chinnaraju // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 113. – P. 794–804. – Текст : непосредственный.
14. Kishore, R. Study on strength characteristics of high strength rice husk ash concrete / R. Kishore, V. Bhikshma, P. J. Prakash // Procedia Engineering. – 2011. – Vol. 14. – P. 2666–2672. – Текст : непосредственный.
15. Varghese, L. Nanosilica-added concrete: strength and its correlation with time-dependent properties / L. Varghese, V. V. L. K. Rao, L. Parameswaran // Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials. – 2019. – Vol. 172, no. 2. – P. 85–94. – Текст : непосредственный.
16. Усанова, К. Ю. дис. Наружные стеновые панели с искусственным заполнителем на основе вяжущего из высококальциевой золы / К. Ю. Усанова – Текст : непосредственный
17. Алипур, М. Влияние применения медного шлака в качестве частичной замены песка в составе бетона / М. Алипур, Г. Э. Окольников // Системные технологии. – 2023. – № 2 (47). – С. 170–177. – Текст : непосредственный
18. Rybakov, V. Strength characteristics of foam concrete samples with various additives / V. Rybakov et al. // MATEC Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Vol. 245. – P. 03015. – Текст : непосредственный.
19. Абрамов, А. К. Аглопорит, полученный из отходов углеобогащения, как заполнитель для легких бетонов / А. К. Абрамов,

- В. И. Ефимов, И. Б. Никулин // Горные науки и технологии. – 2013. – С. 3–11.
– Текст : непосредственный
20. Al-Tarbi, S. M. Development of energy-efficient hollow concrete blocks using perlite, vermiculite, volcanic scoria, and expanded polystyrene / S. M. Al-Tarbi et al. // Constr Build Mater. – Elsevier, 2023. – Vol. 371. – P. 130723.
– Текст : непосредственный
21. Sengul, O. Effect of expanded perlite on the mechanical properties and thermal conductivity of lightweight concrete / O. Sengul et al. // Energy Build. – Elsevier, 2011. – Vol. 43, no. 2–3. – P. 671–676. – Текст : непосредственный
22. Kolak, M. N. Investigation of mechanical and thermal properties of new type bio-composites containing camelina / M. N. Kolak, M. Oltulu // Constr Build Mater. – Elsevier, 2023. – Vol. 362. – P. 129779. – Текст : непосредственный
23. Rakhimov, Sh. T. Development of compositions of fine-grained concrete based on industry waste / Sh. T. Rakhimov, A. Normurodov, I. Nomozov // Oriental Journal of Technology and Engineering. – The USA Journals, 2021. – Vol. 1, no. 01. – P. 10–14. – Текст : непосредственный.
24. Jia, M. Measurement and visualization of crack patterns in basalt fabric reinforced fine-grained concrete with different textile structures using highspeed photography and a cohesive finite element model / M. Jia, K. Yu, K. Qian // Constr Build Mater. – Elsevier, 2022. – Vol. 349. – P. 128785. – Текст : непосредственный.
25. Shobeiri V. et al. Mix design optimization of concrete containing fly ash and slag for global warming potential and cost reduction // Case Studies in Construction Materials. Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01832
26. Nayak D.K. et al. Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies // Cleaner Materials. Elsevier, 2022. Vol. 6. P. 100143
27. Faisal Noaman, M. Effect of fly ash on the shear strength of clay soil / M. Faisal Noaman et al. // Mater Today Proc. – Elsevier, 2023. – Vol. 6(2022). – P. 100151. – Текст : непосредственный.

28. Mohamed A.A.M.S. et al. Improvement of expansive soil characteristics stabilized with sawdust ash, high calcium fly ash and cement // Case Studies in Construction Materials. Elsevier, 2023. Vol. 18. P. e01894
29. Amin M.N. et al. Multigene expression programming based forecasting the hardened properties of sustainable bagasse ash concrete // Materials. MDPI, 2021. Vol. 14, № 19. P. 5659
30. Аксенов, А. В. Композиционное бесцементное вяжущее из механохимически активированных промышленных отходов и мелкозернистый бетон на его основе : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 / Аксенов Андрей Викторович. – Новосибирск, 2005. – 120 с. – Текст : непосредственный.
31. Klyuev S. V. et al. Fibers and their Properties for Concrete Reinforcement //Materials Science Forum. Trans Tech Publications Ltd, 2019. Vol. 945. P. 125–130
32. Jo BW, Kim CH, Tae GH and Park JB (2007) Characteristics of cement mortar with nano- SiO₂ particles. Construction and building materials. 21(6): 1351–1355. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.020>
33. Chahal, N. Influence of bacteria on the compressive strength, water absorption and rapid chloride permeability of concrete incorporating silica fume / N. Chahal, R. Siddique, A. Rajor // Construction and Building Materials. – 2012. – Vol. 37. – P. 645–651. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.029.
34. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Москва : Стандартиформ, 2013. – Текст : непосредственный
35. Палагин, Н. Г. Экономическая эффективность применения двухветвевых колонн одноэтажных производственных зданий с мостовыми кранами из высокопрочного песчаного бетона / Н. Г. Палагин, Э. Р. Аджихай // Строительные конструкции, здания и сооружения. – 2022. – № 1(1). – С. 13-21. – EDN QSCEBZ; Текст : электронный
36. Палагин, Н. Г. Экономическая эффективность колонн прямоугольного сечения одноэтажных производственных зданий с мостовыми

кранами из высокопрочного песчаного бетона / Н. Г. Палагин, Г. П. Никитин, А. Н. Трунов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – № 1(59). – С. 41-53. – DOI 10.52409/20731523_2022_1_41. – EDN MHDEEO

37. Высокоэффективный наномодифицированный бетон повышенной прочности и долговечности [Текст] / С.П. Касаткин, В.Я. Соловьёва, И.В. Степанова, Д.В. Кузнецов, Д.А. Сеницын // Нанотехнологии в строительстве. – 2022. - № 14 (6). – С.493-50

38. Страхов, Д. А. Применение высокопрочного бетона в балках с предварительным напряжением арматуры / Д. А. Страхов, Д. З. Гизатуллина, К. И. Молев // Современное строительство и архитектура. – 2023. – № 2(33). – С. 4-10. – DOI 10.18454/mca.2023.2.33.001. – EDN UHJXYH;

39. Мирсаяпов, И. Т. Оценка эффективности применения высокопрочного бетона в стропильных конструкциях одноэтажных промышленных зданий / И. Т. Мирсаяпов, Д. Р. Ахметзянов // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – № 2(48). – С. 150-159. – EDN UGNWYE

40. Mehta, P.K. Concrete: Microstructure, Properties and Materials / P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. – London : Taylor & Francis, 1993. – Текст : непосредственный.

41. Maholtra, V.M. Pozzolanic and Cementitious Materials / V.M. Maholtra, P.K. Mehta. – London : Taylor & Francis, 1996. – Текст : непосредственный

42. Gesoglu, M. Properties of low binder ultra-high-performance cementitious composites: comparison of nanosilica and microsilica / M. Gesoglu, E. Güneyisi, D. S. Asaad, G. F. Muhyaddin // Construction and Building Materials. – 2016. – Vol. 102, Part 1. – P. 706–713. – Текст : непосредственный

43. Acker, P. DUCTAL_technology: a large spectrum of properties, a wide range of applications / P. Acker, M. Behloul // First International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kasesel, Germany, 2004. – Текст : непосредственный

44. Rebentrost, M. Experience and applications of Ultra-high performance concrete in Asia / M. Rebentrost, G.W. // Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008. – Текст : непосредственный.
45. Fehling, M.S. The Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials / M.S. Fehling, S. Stürwald (Eds.). – Kassel, Germany : Kassel University Press, 2012. – Текст : непосредственный.
46. Zhao, S. Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete / S. Zhao, W. Sun // Constr. Build. Mater. – 2014. – Vol. 63. – P. 150–160. – Текст : непосредственный
47. Graybeal, B.A. Characterization of the behavior of ultra-high performance concrete (Ph.D. thesis) / B.A. Graybeal. – University of Maryland, USA, 2005. – Текст : диссертация
48. Tue, N. Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC / N. Tue, M. Orgass, J. Ma // B Proceedings of the 2nd international symposium on ultra high performance concrete, Kassel (Germany), 2008. – P. 93–100. – Текст : непосредственный.
49. Mehta, P.K. Concrete: microstructure, properties and materials / P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. – McGraw-Hill, 2006. – Текст : непосредственный.
50. Brouwers, H.J.H. Self-compacting concrete: theoretical and experimental study / H.J.H. Brouwers, H.J. Radix // Cem Concr Res. – 2005. – Vol. 35, no. 11. – P. 2116–36. – Текст : непосредственный
51. Smith, J. Discrete modeling of ultra-high-performance concrete with application to projectile penetration / J. Smith, G. Cusatis, D. Pelessone, E. Landis, J. O'Daniel, J. Baylot // Int. J. Impact Eng. – 2014. – Vol. 65. – P. 13–32. – Текст : непосредственный.
52. Abbas, R. Influence of nano-silica addition on properties of conventional and ultra-high performance concretes / R. Abbas // HBRC J. – 2009. – Vol. 5, no. 1. – P. 18–30. – Текст : непосредственный.

53. Rong, Zh. Effects of nano-SiO₂ particles on the mechanical and microstructural properties of ultra-high performance cementitious composites / Zh. Rong, W. Sun, H. Xiao, G. Jiang // *Cem. Concr. Compos.* – 2015. – Vol. 56. – P. 25–31. – Текст : непосредственный.

54. Schröfl, Ch. Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC) / Ch. Schröfl, M. Gruber, J. Plank // *Cem. Concr. Res.* – 2012. – Vol. 42. – P. 1401–1408. – Текст : непосредственный.

55. Ravindra, K.D. Specialist Techniques and Materials for Concrete Production / K.D. Ravindra, N.A. Henderson. – Thomas Telford Publishing, Thomas Telford Ltd, 1999. – Текст : непосредственный.

56. Баженов, Ю.М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – Москва : Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – Текст : непосредственный.

57. Wang, JX. Advances in the applied research of nano-material in concrete / JX Wang, LJ Wang // *Concrete.* – 2004. – Vol. 11. – P. 18–21. – Текст : непосредственный.

58. Khaloo, A. Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete / A. Khaloo, MH Mobini, P Hosseini // *Construction and Building Materials.* – 2016. – Vol. 113. – P. 188–201. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.03.041.

59. Bonavetti, V. Limestone filler cement in low w/c concrete: a rational use of energy / V. Bonavetti, H. Donza, G. Menéndez, O. Cabrera, E. F. Irassar // *Cement and Concrete Research.* – 2003. – Vol. 33, no. 6. – P. 865–871. – Текст : непосредственный.

60. Agarwal, S. K. Compatibility of superplasticizers with different cements / S. K. Agarwal, I. Masood, S. K. Malhotra // *Construction and Building Materials.* – 2000. – Vol. 14, no. 5. – P. 253–259. – Текст : непосредственный

61. Malhotra, V. M. Pozzolanic and Cementitious Materials / V. M. Malhotra, P. K. Mehta. – CRC Press, 2004. – Текст : непосредственный.

62. Pellenq, R. J.-M. Engineering the bonding scheme in C–S–H: the iono-covalent framework / R. J.-M. Pellenq, N. Lequeux, H. Van Damme // *Cement and Concrete Research*. – 2008. – Vol. 38, no. 2. – P. 159–174. – Текст : непосредственный.

63. Abd Elrahman, M. Combined effect of fine fly ash and packing density on the properties of high-performance concrete: an experimental approach / M. Abd Elrahman, B. Hillemeier // *Construction and Building Materials*. – 2014. – Vol. 58. – P. 225–233. – Текст : непосредственный.

64. Kumar, A. A comparison of intergrinding and blending limestone on reaction and strength evolution in cementitious materials / A. Kumar, T. Oey, G. P. Falla, R. Henkensiefken, N. Neithalath, G. Sant // *Construction and Building Materials*. – 2013. – Vol. 43. – P. 428–435. – Текст : непосредственный.

65. Хематибахар, М. Влияние порошка желатина, миндальной скорлупы и вторичных заполнителей на химические и механические свойства обычного бетона / М. Хематибахар, А. Эспархам, Н.И. Ватин, и др. // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 233–250. – DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-233-250. – Текст : непосредственный.

66. Белов, В.В. Механические свойства мелкозернистых карбонатных бетонов с комплексной добавкой, включающей тонкодисперсный известняковый наполнитель и суперпластификатор / В.В. Белов, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая // *Строительная механика инженерных конструкций и сооружений*. – 2023. – Т. 19, № 2. – С. 251–257. – DOI: 10.22363/1815-5235-2023-19-2-251-257. – Текст : непосредственный.

67. Hemalatha, P. Influence of nano material (TiO₂) on self-compacting geo polymer concrete containing flyash, GGBS and wollastonite / P. Hemalatha, K. Ramujee // *Materials Today: Proceedings*. – 2021. – Vol. 43, Part 2. – P. 2438–2442. – Текст : непосредственный.

68. Пономарев, А.Н. Высококачественные бетоны. анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии /

А.Н. Пономарев // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 6 (8). – С. 25-33. – Текст : непосредственный.

69. Коледа, Е.А. Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е.А. Коледа, С.Н. Леонович, С.А. Жданок, Е.Н. Полонина, Н.А. Будревич // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 24-34. – Текст : непосредственный.

70. Оразова, Д.К. Наноприобетон и нанотехнологии в изготовлении бетона / Д.К. Оразова, М.А. Казгожаев // Наука и техника Казахстана. – 2020. – № 3. – С. 60-66. – Текст : непосредственный.

71. Новикова, А.М. Современные виды бетонов для отделки и для конструкций / А.М. Новикова, Л.А. Еропов // Дни науки студентов ИАСЭ - 2021. Материалы научно-практической конференции. – Владимир, 2021. – С. 50-56. – Текст : непосредственный.

72. Мезенцева, А.В. Применение высоких технологий в производстве строительных материалов / А.В. Мезенцева, З.С. Гельманова // Global Science and Innovations: Central Asia. – 2021. – № 4 (13). – С. 23-28. – Текст : непосредственный.

73. Долженкова, М.В. Новые инновационные технологии в строительном производстве и архитектуре / М.В. Долженкова // The World of Science Without Borders. – 2022. – С. 384-391. – Текст : непосредственный.

74. Садовская, Е.А. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для наноприобетона / Е.А. Садовская, Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович, С.А. Жданок, В.В. Потапов // Строительные материалы. – 2021. – № 9. – С. 41-47. – Текст : непосредственный.

75. Смоляков, А.К. Разработка бетона на композиционных вяжущих для высокопрочных фортификационных сооружений / А.К. Смоляков, Р.С. Федюк // СТРОИТЕЛЬСТВО-2016. Материалы II Брянского

международного инновационного форума. – 2016. – С. 143-147. – Текст : непосредственный.

76. Артамонова, О.В. Строительные наноматериалы: тенденции развития и перспективы / О.В. Артамонова, О.Р. Сергуткина // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2013. – № 6. – С. 13-23. – Текст : непосредственный

77. Варакин, М.Ю. Современные виды бетона, используемые в транспортном строительстве / М.Ю. Варакин // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России. Материалы XIII Международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 100-летию профессора Рима Яковлевича Цыганова, основателя высшего дорожного образования в Волгоградской области. – 2019. – С. 111-114. – Текст : непосредственный.

78. Ишутин, А.А. Разнообразие видов бетона / А.А. Ишутин // Молодежь и системная модернизация страны. Сборник научных статей 2-й Международной научной Конференции студентов и молодых ученых. В 4-х томах. – 2017. – С. 270-272. – Текст : непосредственный.

79. Буров, М.П. Эколого-экономические проблемы и совершенствование бетонного производства / М.П. Буров // Технологии бетонов. – 2012. – № 9-10 (74-75). – С. 26-29. – Текст : непосредственный.

80. Комарова, Н.Д. Инновационные технологии - наше ближайшее будущее / Н.Д. Комарова // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства. Международная научно-практическая конференция, посвященная 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. – 2016. – С. 72-76. – Текст : непосредственный.

81. Шкрабовская, А.Ю. Инновационные технологии в строительстве / А.Ю. Шкрабовская, Р.Г. Абакумов // Инновационная наука. – 2017. – Т. 3, № 4. – С. 147-149. – Текст : непосредственный.

82. Грачева, О.О. Инновационные материалы и технологии в строительстве / О.О. Грачева // Инновационное развитие строительства и архитектуры: взгляд в будущее. Сборник тезисов участников Международного студенческого строительного форума - 2017. – 2017. – С. 169-172. – Текст : непосредственный.

83. Низина, Т.А. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок / Т.А. Низина, А.Н. Пономарев, А.С. Балыков // Строительные материалы. – 2016. – № 9. – С. 68-72. – Текст : непосредственный.

84. Грибова, Е.В. К вопросу о необходимости применения инновационных материалов в целях обеспечения эффективного развития строительных предприятий / Е.В. Грибова, С.А. Соколова // Известия МГТУ МАМИ. – 2015. – Т. 5, № 4 (26). – С. 214-217. – Текст : непосредственный.

85. Юкина, Н.А. Перспективы применения современных строительных материалов / Н.А. Юкина, И.П. Соловьева, Т.А. Асаева // Новые технологии в учебном процессе и производстве. материалы XIV Межвузовской научно-технической конференции, посвященной 60-летию института. Под редакцией Платонова А.А., Бакулиной А.А., 2016. – С. 463-466. – Текст : непосредственный.

86. Sanchez, F. Nanotechnology in concrete – a review / F. Sanchez, K. Sobolev // Constr. Build. Mater. – 2010. – Vol. 24, no. 11. – P. 2060–2071. – Текст : непосредственный.

87. Jennings, H.M. Characterization and modeling of pores and surfaces in cement paste: correlations to processing and properties / H.M. Jennings, J.W. Bullard, J.J. Thomas, J.E. Andrade, J.J. Chen, G.W. Scherer // J. Adv. Concr. Technol. – 2008. – Vol. 6, no. 1. – P. 5–29. – Текст : непосредственный.

88. Khaloo, A. Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete / A. Khaloo, M. H. Mobini, P. Hosseini // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 113. – P. 188–201. – Текст : непосредственный.
89. Ashby, M. *Nanomaterials, Nanotechnologies and Design: An Introduction for Engineers and Architects* / M. Ashby, P. Ferreira, D. Schodek. – Boston, MA : Elsevier Science Ltd, 2009. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8149-0.X0001-3>. – Текст : непосредственный.
90. Jankowska, E. Emission of nanosize particles in the process of nanoclay blending / E. Jankowska, W. Zatorski // *2009 Third International Conference on Quantum, Nano and Micro Technologies*. – IEEE, 2009. – Текст : непосредственный.
91. Hakamy, A. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites / A. Hakamy, F. U. A. Shaikh, I. M. Low // *Composites Part B: Engineering*. – 2015. – Vol. 78. – P. 174–184. – Текст : непосредственный.
92. Sobolev, K. *Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives* American Concrete Institute, ACI Special Publication: Preface / K. Sobolev, S. P. Shah // American Concrete Institute, ACI Special Publication 254 SP. – 2008. – Текст : непосредственный.
93. Sahin, R. New materials for concrete technology: nanopowders / R. Sahin, M. Oltulu // *33rd Conference on Our World in Concrete & Structures*, 2008. – Текст : непосредственный.
94. Balaguru, P. *Nanotechnology and concrete: research opportunities* / P. Balaguru, K. Chong // *Proceedings of the ACI Session on Nanotechnology of Concrete: Recent Developments and Future Perspectives*. – Denver, USA : National Science Foundation, 2006. – P. 15–28. – Текст : непосредственный.
95. Li, H. Microstructure of cement mortar with nanoparticles / H. Li, H.-G. Xiao, J. Yuan, J. Ou // *Composites Part B: Engineering*. – 2004. – Vol. 35, no. 2. – P. 185–189. – Текст : непосредственный.

96. Hou, P. Effects of the pozzolanic reactivity of nanoSiO₂ on cement-based materials / P. Hou, J. Qian, X. Cheng, S. P. Shah // *Cement and Concrete Composites*. – 2015. – Vol. 55. – P. 250–258. – Текст : непосредственный.
97. Crainic, N. Nanocomposites: a state-of-the-art review / N. Crainic, A. T. Marques // *Key Engineering Materials*. – 2002. – Vol. 230-232. – P. 656. – Текст : непосредственный.
98. Tanveer Hussain, S. Study of strength properties of concrete by using micro silica and nano silica / S. Tanveer Hussain, K. V. S. Gopala Krishna Sastry // *International Journal of Research in Engineering and Technology*. – 2014. – Vol. 3, no. 10. – P. 103–108. – Текст : непосредственный.
99. Alhawati, M. Influence of using different surface areas of nano silica on concrete properties / M. Alhawati, A. Ashour, A. El-Khoja // *AIP Conference Proceedings*. – 2019. – Vol. 2146, Article ID 020007. – Текст : непосредственный.
100. Kumar, S. Influence of nanosilica on mechanical and durability properties of concrete / S. Kumar, A. Kumar, J. Kujur // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. – 2019. – P. 781–788. – Текст : непосредственный.
101. Li, L. G. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect / L. G. Li, J. Y. Zheng, J. Zhu, A. K. H. Kwan // *Construction and Building Materials*. – 2018. – Vol. 168. – P. 622–632. – Текст : непосредственный.
102. Huseien, G. F. *Nanotechnology for Smart Concrete* / G. F. Huseien, N. H. A. Khalid, J. Mirza. – CRC Press, 2022. – Текст : непосредственный.
103. Комохов, Применение нанотехнологий в производстве бетонов / Комохов. – Текст : непосредственный // Популярное бетоноведение : Сб. тезисов (22-24 марта 2007 года). – СПб, 2007. – С. 7-8.
104. Ashwini, R. M. Compressive and Flexural Strength of Concrete with Different Nanomaterials: A Critical Review / R. M. Ashwini, M. Potharaju, V. Srinivas, S. Kanaka Durga, G. V. Rathnamala, Anish Paudel // *Hindawi Journal*

of Nanomaterials. – 2023. – Article ID 1004597. – 15 pages. – DOI: <https://doi.org/10.1155/2023/1004597>. – Текст : электронный.

105. Zhang, P. Influence of nano-SiO₂ on properties of fresh and hardened high performance concrete: A state-of-the-art review / P. Zhang, J. Wan, K. Wang, Q. Li // Construction and Building Materials. – 2017. – Vol. 148. – P. 648–658. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.059>. – Текст : непосредственный.

106. Bjornstrom, J. Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium-silicate-hydrate formation in cement / J. Bjornstrom, A. Matic, L. Borjesson, I. Panas // Chemical Physics Letters. – 2004. – Vol. 392, no. 1–3. – P. 242–248. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.05.071>. – Текст : непосредственный.

107. Fu, M.F. Study and application of nano-materials in concrete / M.F. Fu, J.G. Xiong, G.Q. Song // Eng. Mech. – 2004. – Vol. 21. – P. 48–51. – Текст : непосредственный.

108. Jalal, M. Comparative study on effects of Class F fly ash, nano silica and silica fume on properties of high performance self compacting concrete / M. Jalal, A. Pouladkhan, O.F. Harandi, D. Jafari // Construction and Building Materials. – 2015. – Vol. 94. – P. 90–104. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2015.07.001. – Текст : непосредственный.

109. Du, H. Durability performances of concrete with nano-silica / H. Du, S. Du, X. Liu // Construction and Building Materials. – 2014. – Vol. 73. – P. 705–712. – DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014. – Текст : непосредственный.

110. Quercia, G. Characterization of morphology and texture of several amorphous nano-silica particles used in concrete / G. Quercia, A. Lazaro, J.W. Geus, H.J.H. Brouwers // Cement and Concrete Composites. – 2013. – Vol. 44. – P. 77–92. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.05.006>. – Текст : непосредственный.

111. Madani, H. Chloride penetration and electrical resistivity of concretes containing nanosilica hydrosols with different specific surface areas / H. Madani,

A. Bagheri, T. Parhizkar, A. Raisghasemi // *Cement and Concrete Composites*. – 2014. – Vol. 53. – P. 18–24. – DOI:10.1016/j.cemconcomp.2014.06.006. – Текст : непосредственный.

112. Belkowitz, J.S. Impact of nanosilica size and surface area on concrete properties / J.S. Belkowitz, W.B. Belkowitz, K. Nawrocki, F.T. Fisher // *ACI Materials Journal*. – 2015. – Vol. 112, no. 3. – P. 419–427. – Текст : непосредственный.

113. Morsy, M.S. Hybrid effect of carbon nanotube and nano-clay on physico-mechanical properties of cement mortar / M.S. Morsy, S.H. Alsayed, M. Aqel // *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol. 25, no. 1. – P. 145–149. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.046>. – Текст : непосредственный.

114. Atmaca, N. Effects of nano-silica on the gas permeability, durability and mechanical properties of high-strength lightweight concrete / N. Atmaca, M.L. Abbas, A. Atmaca // *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 147. – P. 17–26. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.156>. – Текст : непосредственный.

115. Mohamed, A.M. Influence of nano materials on flexural behavior and compressive strength of concrete / A.M. Mohamed // *HBRC Journal*. – 2016. – Vol. 12, no. 2. – P. 212–225. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.11.006>. – Текст : непосредственный.

116. Deilami, S. An experimental study on durability and strength of SCC incorporating FA, GGBS and MS / S. Deilami, F. Aslani, M. Elchalakani // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*. – 2018. – P. 1–45. – DOI: <https://doi.org/10.1680/jstbu.17.00129>. – Текст : непосредственный.

117. Deilami, S. Durability assessment of self-compacting concrete with fly ash / S. Deilami, F. Aslani, M. Elchalakani // *Computers and Concrete*. – 2017. – Vol. 19, no. 5. – P. 489–499. – DOI:10.12989/cac.2017.19.5.489. – Текст : непосредственный.

118. Wille, K. Effect of Ultra-high-performance concrete on pullout behavior of high-strength brass-coated straight steel fibers / K. Wille, A.E. Naaman // *ACI Mater. J.* – 2013. – Vol. 110, no. 4. – Текст : непосредственный.

119. Fehling, M.S. The Third International Symposium on Ultra High Performance Concrete and Nanotechnology for High Performance Construction Materials / M.S. Fehling, S. Stürwald (Eds.). – Kassel, Germany : Kassel University Press, 2012. – Текст : непосредственный.

120. Safan, M.A. Compressive strength of Portland cement pastes and mortars containing Cu–Zn nano-ferrite / M.A. Safan [et al.] // *Int. J. Nano Dimension.* – 2012. – Vol. 3, no. 2. – P. 91–100. – Текст : непосредственный.

121. Quercia, G. Water demand of amorphous nano silica and its impact on the workability of cement paste / G. Quercia, G. Hüsken, H.J.H. Brouwers // *Cem. Concr. Res.* – 2012. – Vol. 42. – P. 344–357. – Текст : непосредственный.

122. Ltifi, M. Experimental study of the effect of addition of nano-silica on the behaviour of cement mortars / M. Ltifi, A. Guefrech, P. Mounanga, A. Khelidj // *Procedia Eng.* – 2011. – Vol. 10. – P. 900–905. – Текст : непосредственный.

123. Hosseini, P. Developing concrete recycling strategies by utilization of nano-SiO₂ particles / P. Hosseini, A. Booshehrian, A. Madari // *Waste Biomass Valor.* – 2011. – Vol. 2, no. 3. – P. 347–355. – Текст : непосредственный.

124. Dunster, A. Silica Fume in Concrete / A. Dunster // *Information Paper N° IP 5/09.* – Garston, UK : IHS BRE Press, 2009. – P. 1–12. – Текст : непосредственный.

125. Madani, H. The pozzolanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence on the hydration characteristics of Portland cement / H. Madani, A. Bagheri, T. Parhizkar // *Cem. Concr. Res.* – 2012. – Vol. 42. – P. 1563–1570. – Текст : непосредственный.

126. Taheri-Behrooz, F. Mechanical properties modification of a thin film phenolic resin filled with nano silica particles / F. Taheri-Behrooz, B. Memar Maher, M.M. Shokrieh // *Comput. Mater. Sci.* – 2015. – Vol. 96. – P. 411–415. – Текст : непосредственный.

127. Du, H. Durability performances of concrete with nano-silica / H. Du, S. Du, X. Liu // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – Vol. 73. – P. 705–712. – Текст : непосредственный.

128. Sobolev, K. Engineering of SiO₂ nanoparticles for optimal performance in nano cement based materials / K. Sobolev, I. Flores, L.M. Torres-Martinez, P.L. Valdez, E. Zarazua, E.L. Cuellar // *Nanotechnology in Construction: Proceedings of the NICOM3 (3rd International Symposium on Nanotechnology in Construction)*. – Prague, Czech Republic, 2009. – P. 139–148. – Текст : непосредственный.

129. Zaki, S.I. How nanotechnology can change concrete industry / S.I. Zaki, S. Ragab Khaled // *1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries*. – Oran, Algeria, 2009. – Vol. 1. – P. 407–414. – Текст : непосредственный.

130. Du, H.D. Effect of colloidal nano-silica on the mechanical and durability performances of mortar / H. Du, S.D. Pang // *Key Eng. Mater.* – 2014. – Vol. 629. – P. 443–448. – Текст : непосредственный.

131. Nazari, A. The effects of SiO₂ nanoparticles on physical and mechanical properties of high strength compacting concrete / A. Nazari, S. Riahi // *Compos. Eng.* – 2011. – Vol. 42, no. 3. – P. 570–578. – Текст : непосредственный.

132. Малькова, М.Ю. Нанотехнологии в металлургической отрасли : Монография / М.Ю. Малькова, А.Н. Задиранов, А.Б. Найзабеков, С.Н. Лежнев, В.А. Андреященко. – Темиртау : Изд-во КГИУ, 2013. – 200 с. – Текст : непосредственный.

133. Senff, L. Effect of nano-SiO₂ and nano-TiO₂ addition on the rheological behavior and the hardened properties of cement mortars / L. Senff, D. Hotza, S. Lucas, V.M. Ferreira, J.A. Labrincha // *Mater. Sci. Eng., A*. – 2012. – Vol. 532. – P. 354–361. – Текст : непосредственный.

134. Hosseini, P. Developing concrete recycling strategies by utilization of nano-SiO₂ particles / P. Hosseini, A. Booshehrian, A. Madari // *Waste Biomass Valor.* – 2011. – Vol. 2, no. 3. – P. 347–355. – Текст : непосредственный.

135. Senff, L. Mortars with nano-SiO₂ and micro-SiO₂ investigated by experimental design / L. Senff, D. Hotza, W.L. Repette, V.M. Ferreira, J.A. Labrincha // *Constr. Build. Mater.* – 2010. – Vol. 24. – P. 1432–1437. – Текст : непосредственный.

136. Najigivi, A. Investigating the effects of using different types of SiO₂ nanoparticles on the mechanical properties of binary blended concrete / A. Najigivi, A. Khaloo, A. Iraj Zad, S. Abdul Rashid // *Compos. Part B.* – 2013. – Vol. 54. – P. 52–58. – Текст : непосредственный.

137. Kong, D. Influence of nano-silica agglomeration on fresh properties of cement pastes / D. Kong, Y. Su, X. Du, Y. Yang, S. Wei, S.P. Shah // *Constr. Build. Mater.* – 2013. – Vol. 43. – P. 557–562. – Текст : непосредственный.

138. Haruehansapong, S. Effect of the particle size of nanosilica on the compressive strength and the optimum replacement content of cement mortar containing nano-SiO₂ / S. Haruehansapong, T. Pulngern, S. Chucheeesakul // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – Vol. 50. – P. 471–477. – Текст : непосредственный.

139. Senff, L. Effect of nano- silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars / L. Senff, J.A. Labrincha, V.M. Ferreira, D. Hotza, W.L. Repette // *Constr. Build. Mater.* – 2009. – Vol. 23. – P. 2487–2489. – Текст : непосредственный.

140. Pourjavadi, A. Interactions between superabsorbent polymers and cement-based composites incorporating colloidal silica nanoparticles / A. Pourjavadi, S.M. Fakoorpoor, P. Hosseini, A. Khaloo // *Cem. Concr. Compos.* – 2013. – Vol. 37. – P. 196–204. – Текст : непосредственный.

141. Bahadori, H. Reduction of cement consumption by the aid of silica nanoparticles (investigation on concrete properties) / H. Bahadori, P. Hosseini // *J. Civ. Eng. Manage.* – 2012. – Vol. 18, no. 3. – P. 416–425. – Текст : непосредственный.

142. Hosseinpourpia, R. Production of waste bio-fiber cement-based composites reinforced with nano-SiO₂ particles as a substitute for asbestos cement composites / R. Hosseinpourpia, A. Varshoei, M. Soltani, P. Hosseini, H. Ziaei

Tabari // Constr. Build. Mater. – 2012. – Vol. 31. – P. 105–111. – Текст : непосредственный.

143. Hosseini, P. Influence of nano-SiO₂ addition on microstructure and mechanical properties of cement mortars for ferrocement / P. Hosseini, A. Booshehrian, S. Farshchi // J. Trans. Res. Rec. – 2010. – Vol. 2141. – P. 15–20. – Текст : непосредственный.

144. Kim, J.J. Nanosilica effects on composition and silicate polymerization in hardened cement paste cured under high temperature and pressure / J.J. Kim, M.K. Rahman, A.A. Al-Majed, M.M. Al-Zahrani, M.M. Reda Taha // Cem. Concr. Compos. – 2013. – Vol. 43. – P. 78–85. – Текст : непосредственный.

145. Zyganitidis, I. Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO₂ nanoparticles / I. Zyganitidis, M. Stefanidou, N. Kalfagiannis, S. Logothetidis // Mater. Sci. Eng., B. – 2011. – Vol. 176. – P. 1580–1584. – Текст : непосредственный.

146. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – Москва : Стандартинформ, 2010. – 12 с. – Текст : непосредственный.

147. Майоров, А. Г. Модифицирующие добавки для бетона: виды, применение / А. Г. Майоров, Ш. А. Нурмагомедов. – Текст : электронный // Актуальные исследования. – 2022. – № 50(129). – Ч. I. – С. 63-70. – URL: <https://apni.ru/article/5176-modifitsiruyushchie-dobavki-dlya-betona-vidi> (дата обращения: 10.09.2025).

148. Salman, M. M. Influence of partial replacement TiO₂ nanoparticles on the compressive and flexural strength of ordinary cement mortar / M. M. Salman, K. M. Eweed, A. M. Hameed // Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences. – 2016. – Vol. 19, no. 2. – P. 265–270. – Текст : непосредственный

149. Behfarnia, K. The effects of TiO₂ and ZnO nanoparticles on physical and mechanical properties of normal concrete / K. Behfarnia, A. Azarkeivan, A. Keivan // Asian Journal of Civil Engineering (BHRC). – 2013. – Vol. 14, no. 4. – P. 517–531. – Текст : непосредственный.

150. Guan, B. The electromagnetic wave absorbing properties of cement-based composites using natural magnetite powders as absorber / B. Guan, D. Ding, L. Wang, J. Wu, R. Xiong // *Mater. Res. Express.* – 2017. – 056103. – Текст : непосредственный.

151. Givi, A. N. Experimental investigation of the size effects of SiO₂ nano – particles on the mechanical properties of binary blended concrete / A. N. Givi, S. A. Rashid, F. N. A. Aziz, M. A. M. Salleh // *Composites Part B.* – 2010. – Vol. 41. – P. 673-7. – Текст : непосредственный.

152. Han, B. Reactive powder concrete reinforced with nano SiO₂ – coated TiO₂ / B. Han, Z. Li, L. Zhang, S. Zeng, X. Yu, B. Han, J. Ou // *Constr. Build. Mater.* – 2017. – Vol. 148. – P. 104-12. – Текст : непосредственный.

153. Su, Y. Influences of nano-particles on dynamic strength of ultra-high performance concrete / Y. Su, J. Li, C. Wu, [et al.] // *Compos. B Eng.* – 2016. – Vol. 91. – P. 595–609. – Текст : непосредственный.

154. Jalal, M. Effects of fly ash and TiO₂ nano particles on rheological, mechanical, microstructural and thermal properties of high strength self compacting concrete / M. Jalal, M. Fathi, M. Farzad // *Mech. Mater.* – 2013. – Vol. 61. – P. 11-27. – Текст : непосредственный.

155. Chen, J. Hydration and properties of nano – TiO₂ blended cement composites / J. Chen, S. C. Kou, C. S. Poon // *Cem. Concr. Compos.* – 2012. – Vol. 34. – P. 642-9. – Текст : непосредственный.

156. Farzadnia, N. Effect of halloysite nanoclay on mechanical properties, thermal behavior and microstructure of cement mortars / N. Farzadnia, A.A.A. Ali, R. Demirboga, M.P. Anwar // *Cem. Concr. Res.* – 2013. – Vol. 48. – P. 97–104. – Текст : непосредственный.

157. Nehdi, M.L. Clay in cement-based materials: critical overview of state-of-the-art / M.L. Nehdi // *Constr. Build. Mater.* – 2014. – Vol. 51. – P. 372–382. – Текст : непосредственный.

158. Aly, M. Effect of nano clay particles on mechanical, thermal and physical behaviours of waste-glass cement mortars / M. Aly, M.S.J. Hashmi,

A.G. Olabi, M. Messeiry, A.I. Hussain // Mater. Sci. Eng., A. – 2011. – Vol. 528, no. 27. – P. 7991–7998. – Текст : непосредственный.

159. Alamri, H. Mechanical, thermal and microstructural characteristics of cellulose fibre reinforced epoxy/organoclay nanocomposites / H. Alamri, I.M. Low, Z. Alothman // Compos. Part B. – 2012. – Vol. 43, no. 7. – P. 2762–2771. – Текст : непосредственный.

160. He, X. Chloride permeability and microstructure of cement mortars incorporating nanomaterials / X. He, X. Shi // Trans. Res. Rec. – 2008. – Vol. 2070. – P. 13–21. – Текст : непосредственный.

161. Gopalakrishnan, K. Nanotechnology in Civil Infrastructure / K. Gopalakrishnan, B. Birgisson, P. Taylor, N. Attoh-Okine. – Berlin/Heidelberg : Springer, 2011. – Текст : непосредственный.

162. Lin, K.L. Effects of nano-SiO₂ and different ash particle sizes on sludge ash–cement mortar / K.L. Lin, W.C. Chang, D.F. Lin, H.L. Luo, M.C. Tsai // J. Environ. Manage. – 2008. – Vol. 88. – P. 708–714. – Текст : непосредственный.

163. Nazari, A. The effects of TiO₂ nanoparticles on physical, thermal and mechanical properties of concrete using ground granulated blast furnace slag as binder / A. Nazari, S. Riahi // Mater. Sci. Eng., A. – 2011. – Vol. 528. – P. 2085–2092. – Текст : непосредственный.

164. Nazari, A. The role of SiO₂ nanoparticles and ground granulated blast furnace slag admixtures on physical, thermal and mechanical properties of self compacting concrete / A. Nazari, S. Riahi // Mater. Sci. Eng., A. – 2011. – Vol. 528. – P. 2149–2157. – Текст : непосредственный.

165. Kuo, W. Effects of organo-modified montmorillonite on strengths and permeability of cement mortars / W. Kuo, J. Huang, C. Lin // Cem. Concr. Res. – 2006. – Vol. 36. – P. 886–895. – Текст : непосредственный.

166. Wei, J. Sisal fiber-reinforced cement composite with Portland cement substitution by a combination of metakaolin and nanoclay / J. Wei, C. Meyer // J. Mater. Sci. – 2014. – Vol. 49, no. 21. – P. 7604–7619. – Текст : непосредственный.

167. Pavlidou, S. A review on polymer-layered silicate nano- composites / S. Pavlidou, C.D. Papaspyrides // *Prog. Polym. Sci.* – 2008. – Vol. 33. – P. 1119–1198. – Текст : непосредственный.
168. Taghiyari, H.R. Gas Permeability Measurement Apparatus / H.R. Taghiyari, D. Parsapajouh // *U.S Patent, (Ed.)*. – 2011. – Текст : непосредственный.
169. Hakamy, A. Characteristics of nanoclay and calcined nanoclay-cement nanocomposites / A. Hakamy, F.U.A. Shaikh, I.M. Low // *Compos. Part B: Eng.* – 2015. – Vol. 78. – P. 174–184. – Текст : непосредственный.
170. Morsy, M.S. Hybrid effect of carbon nanotube and nanoclay on physico-mechanical properties of cement mortar / M.S. Morsy, S.H. Alsayed, M. Aqel // *Constr. Build. Mater.* – 2011. – Vol. 25, no. 1. – P. 145–149. – Текст : непосредственный.
171. Morsy, M.S. Effect of nano-clay on mechanical properties and microstructure of ordinary Portland cement mortar / M.S. Morsy, S.H. Alsayed, M. Aqel // *Int. J. Civ. Environ. Eng.* – 2010. – Vol. 10. – P. 23–27. – Текст : непосредственный.
172. Abo-El-Enein, S.A. Pozzolanic and hydraulic activity of nano-metakaolin / S.A. Abo-El-Enein, M.S. Amin, F.I. El-Hosiny, S. Hanafi, T.M. El-Sokkary, M.M. Hazem // *HBRC, Fifth International Conference on Nano-Technology in Construction, 2013*. – Текст : непосредственный.
173. Abo-El-Enein, S.A. Pozzolanic and hydraulic activity of nano-metakaolin / S.A. Abo-El-Enein, M.S. Amin, F.I. El-Hosiny, S. Hanafi, T.M. El-Sokkary, M.M. Hazem // *HBRC J.* – 2014. – Vol. 10. – P. 64–72. – Текст : непосредственный.
174. El-Gamal, S.M.A. Hydration characteristics and compressive strength of hardened cement pastes containing nano-metakaolin / S.M.A. El-Gamal, M.S. Amin, M. Ramadan // *HBRC J.* – 2015. – URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2014.11.008>. – Текст : электронный.

175. Lindgreen, H. Microstructure engineering of Portland cement pastes and mortars through addition of ultrafine layer silicates / H. Lindgreen, M. Geiker, H. Krøyer, N. Springer, J. Skibsted // *Cem. Concr. Compos.* – 2008. – Vol. 30, no. 8. – P. 686–699. – Текст : непосредственный.

176. Singh, N.B. / N.B. Singh, S.K. Saxena, M. Kumar // *Mater. Today: Proc.* – 2018. – Vol. 5. – P. 9035–9040. – Текст : непосредственный.

177. Aarhi, K. Durability studies on fibre reinforced self compacting concrete with sustainable wastes/ K. Aarhi, K. Arunachalam // *J. Clean. Prod.* – 2018. – Vol. 174. – P. 247–255. – Текст : непосредственный.

178. Волынкина, Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России / Е.П. Волынкина // *Вестник Сибирского государственного индустриального университета.* – 2017. – № 2 (20). – С. 43–49. – Текст : непосредственный.

179. Шишакина, О.А. Обзор направлений утилизации техногенных отходов в производстве строительных материалов / О.А. Шишакина, А.А. Паламарчук. – Текст : электронный // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований.* – 2019. – № 4. – С. 198-203. – URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=12723> (дата обращения: 10.09.2025).

180. Ветошкин, А.Г. Технологии защиты окружающей среды от отходов производства и потребления / А.Г. Ветошкин. – Москва: Лань, 2016. – 304 с. – Текст : непосредственный.

181. Горшков, Р.К. Использование вторичных ресурсов в промышленности строительных материалов: методология и практика : монография / Р.К. Горшков. – Москва : Экслибрис-Пресс, 2004. – 288 с. – Текст : непосредственный.

182. Patil, S.B. Imperial smelting furnace slag as fine aggregate in cement concrete mixes / S.B. Patil, A.K. Vyas, A.B. Gupta, R.S. Patil // *Journal of solid waste technology and management.* – Widner University, USA, 2016. – Vol. 42, no. 2. – P.128–136. – Текст : непосредственный.

183. Li L.G. Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect / L.G. Li, J.Y. Zhu, A.K.H. Kwan // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – Vol. 168. – P. 622–632. – Текст : непосредственный.

184. Mohammed, B.S. Evaluating the effect of crumb rubber and nano silica on the properties of high volume fly ash roller compacted concrete pavement using non-destructive techniques / B.S. Mohammed, M. Adamu, M.S. Liew // *Case Stud. Constr. Mater.* – 2018. – Vol. 8. – P. 380–391. – Текст : непосредственный.

185. Ameri, F. Optimum rice husk ash content and bacterial concentration in self-compacting concrete / F. Ameri, P. Shoaee, N. Bahrami, M. Vaezi // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Vol. 222. – P. 796–813. – Текст : непосредственный.

186. Zareei, S.A. Recycled ceramic waste high strength concrete containing wollastonite particles and micro-silica: A comprehensive experimental study / S.A. Zareei, F. Ameri, P. Shoaee, N. Bahrami // *Constr. Build. Mater.* – 2019. – Vol. 201. – P. 11–32. – Текст : непосредственный.

187. Taфраoui, A. Metakaolin in the formulation of UHPC / A. Taфраoui, [et al.] // *Constr. Build. Mater.* – 2009. – Vol. 23, no. 2. – P. 669–674. – Текст : непосредственный.

188. Mostafa, N.Y. High replacements of reactive pozzolan in blended cements: microstructure and mechanical properties / N.Y. Mostafa, [et al.] // *Cement Concr. Compos.* – 2010. – Vol. 32, no. 5. – P. 386–391. – Текст : непосредственный.

189. Mehta, P.K. *Concrete: Microstructure, Properties and Materials* / P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. – London : Taylor & Francis, 1993. – Текст : непосредственный.

190. Maholtra, V.M. *Pozzolanic and Cementitious Materials* / V.M. Maholtra, P.K. Mehta. – London : Taylor & Francis, 1996. – Текст : непосредственный.

191. Каприелов, С.С. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами / С.С. Каприелов, А.В. Шейнфельд, Г.С. Кардумян, И.А. Чилин. – Текст : электронный. – URL: <https://journal->

cm.ru/images/files/2017/каприелов_о_подборе.pdf (дата обращения: 10.09.2025).

192. Лхасаранов, С.А. Модифицированный бетон на композиционных вяжущих с применением нанокремнезема : тема диссертации и автореферата по ВАК РФ 05.23.05, кандидат наук / Лхасаранов Солбон Александрович. – Текст : электронный. – URL: <https://www.dissercat.com/content/modifitsirovannyi-beton-na-kompozitsionnykh-vyazhushchikh-s-primeneniem-nanokremnezema> (дата обращения: 10.09.2025).

193. Трунов, П.В. Композиционные вяжущие с использованием вулканогенно-осадочных пород Камчатки и мелкозернистые бетоны на их основе : тема диссертации и автореферата по ВАК РФ 05.23.05, кандидат наук / Трунов Павел Викторович. – Текст : электронный. – URL: <https://www.dissercat.com/content/kompozitsionnye-vyazhushchie-s-ispolzovaniem-vulkanogenno-osadochnykh-porod-kamchatki-i-melkozern> (дата обращения: 10.09.2025).

194. Shi, Caijun. High performance cementing materials from industrial slags — a review / Caijun Shi, Jueshi Qian // Resour. Conserv. Recycl. – 2000. – Vol. 29, no. 3. – P. 195–207. – Текст : непосредственный.

195. Al-Jabri, K. Influence of nano metakaolin on thermo-physical, mechanical and microstructural properties of high-volume ferrochrome slag mortar / K. Al-Jabri, H. Shoukry // Construct. Build. Mater. – 2018. – Vol. 177. – P. 210–221. – Текст : непосредственный.

196. Ефимов, Н.Н. Экологические аспекты и проблемы утилизации и рециклинга золошлаковых отходов тепловых электростанций / Н.Н. Ефимов, Е.А. Яценко, В.А. Смолий, А.С. Косарев, В.В. Копица // Экология промышленного производства. – 2011. – № 2. – С. 40–44. – Текст : непосредственный.

197. Begich, Y.E. Fine-grained concrete with various types of fibers / Y.E. Begich, S.V. Klyuev, V.A. Jos, A.V. Cherkashin // Magazine of Civil

Engineering. – 2020. – No. 5(97). – DOI 10.18720/MCE.97.2. – EDN CHTDTA. – Текст : непосредственный.

198. Wu, Wei. Optimum content of copper slag as a fine aggregate in high strength concrete / Wei Wu, Weide Zhang, Guowei Ma // Mater. Des. – 2010. – Vol. 31. – P. 2878–2883. – Текст : непосредственный.

199. Al-Jabri, K.S. Use of copper slag and cement by-pass dust as cementitious materials / K.S. Al-Jabri, R. Taha, M. Al-Ghassani // Cem. Concr. Aggregate. – 2002. – Vol. 24, no. 1. – P. 7–12. – Текст : непосредственный.

200. Al-Jabri, K.S. Copper slag as sand replacement for high performance concrete / K.S. Al-Jabri, Makoto Al-Jabri, Salem K. Al-Oraimi, Abdullah H. Al-Saidy // Cem. Concr. Compos. – 2009. – Vol. 31, no. 7. – P. 483–488. – Текст : непосредственный.

201. Caliskan, S. Recycling copper slag as coarse aggregate: hardened properties of concrete / S. Caliskan, A. Behnood // Proceedings of Seventh International Conference on Concrete Technology in Developing Countries, 2004. – P. 91–98. – Текст : непосредственный.

202. Tixier, R. Effect of copper slag on the hydration and mechanical properties of cementitious mixtures / R. Tixier, R. Devaguptapu, B. Mobasher // Cem. Concr. Res. – 1997. – Vol. 27, no. 10. – P. 1569–1580. – Текст : непосредственный.

203. Shi, Caijun. Utilization of copper slag in cement and concrete / Caijun Shi, Christian Meyer, Ali Behnood // Resour. Conserv. Recycl. – 2008. – Vol. 52, no. 10. – P. 1115–1120. – Текст : непосредственный.

204. Ayano, T. Durability of concrete with copper slag fine aggregate / T. Ayano, K. Sakata // Proceedings of the Fifth CANMET/ACI International Conference on Durability of Concrete, SP-192, 2000. – P. 141–158. – Текст : непосредственный.

205. Hwang, C.L. Properties of concrete using copper slag as a substitute for fine aggregate / C.L. Hwang, J.C. Laiw // Proceedings of the 3rd International

Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag, and Natural Pozzolans in Concrete, SP-114-82, 1989. – P. 1677–1695. – Текст : непосредственный.

206. Khanzadi, M. Mechanical properties of high-strength concrete incorporating copper slag as coarse aggregate / M. Khanzadi, A. Behnood // *Cem. Concr. Compos.* – 2009. – Vol. 23, no. 6. – P. 2183–2188. – Текст : непосредственный.

207. Коэффициент надежности по материалу для фибробетона / С. В. Ключев, Н. Ф. Кашапов, О. В. Радайкин [и др.] // *Строительные материалы и изделия.* – 2022. – Т. 5, № 2. – С. 51-58. – DOI 10.58224/2618-7183-2022-5-2-51-58. – EDN QVQYPJ. – Текст : непосредственный.

208. Mechanical properties of high-performance hybrid fibre-reinforced concrete at elevated temperatures / M. Mubarak, R. S. M. Rashid, M. Amran [et al.] // *Sustainability.* – 2021. – Vol. 13, No. 23. – DOI 10.3390/su132313392. – EDN WUJBXZ. – Текст : непосредственный.

209. Begich, Y.E. Fine-grained concrete with various types of fibers / Y.E. Begich, S.V. Klyuev, V.A. Jos, A.V. Cherkashin // *Magazine of Civil Engineering.* – 2020. – No. 5(97). – DOI 10.18720/MCE.97.2. – EDN CHTDTA. – Текст : непосредственный.

210. Netinger Grubešsa, I. Effect of hemp fibers on fire resistance of concrete / I. Netinger Grubešsa, B. Marković, A. Gojević, J. Brdarić // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – Vol. 184. – P. 473–484. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.014>. – Текст : электронный.

211. Senthilkumar, K. Mechanical properties evaluation of sisal fibre reinforced polymer composites: a review / K. Senthilkumar, [et al.] // *Constr. Build. Mater.* – 2018. – Vol. 174. – P. 713–729. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.143>. – Текст : электронный.

212. Wei, J. Improving degradation resistance of sisal fiber in concrete through fiber surface treatment / J. Wei, C. Meyer // *Appl. Surf. Sci.* – 2014. – Vol. 289. – P. 511–523. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.11.024>. – Текст : электронный.

213. Mei, Z. Concrete formwork reuse in a supply chain with dynamic changes using ABMS and discrete events / Z. Mei, M. Xu, S. Luo, Y. Tan, H. Li // *J. Clean. Prod.* – 2022. – Vol. 332. – P. 130038. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130038>. – Текст : электронный.

214. Osman, A.I. Cost, environmental impact, and resilience of renewable energy under a changing climate: a review / A.I. Osman, L. Chen, M. Yang, G. Msigwa, M. Farghali, S. Fawzy, D.W. Rooney, P.-S. Yap // *Environ. Chem. Lett.* – 2022. – Vol. 21. – P. 741–764. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01532-8>. – Текст : электронный.

215. Shimamoto, Y. Recycle of rice husk into agro-infrastructure for decreasing carbon dioxide / Y. Shimamoto, T. Suzuki // *Paddy Water Environ.* – 2019. – Vol. 17. – P. 555–559. – URL: <https://doi.org/10.1007/s10333-019-00752-z>. – Текст : электронный.

216. Phiri, R. Development of sustainable biopolymer-based composites for lightweight applications from agricultural waste biomass: a review / R. Phiri, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin, O.P. Oladijo, H.N. Dhakal // *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research.* – 2023. – P. 436–450. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.aiepr.2023.04.004>. – Текст : электронный.

217. Abdur Rahman, M. A review of environmental friendly green composites: production methods, current progresses, and challenges / M. Abdur Rahman, S. Haque, M.M. Athikesavan, M.B. Kamaludeen // *Environ. Sci. Pollut. Control Ser.* – 2023. – Vol. 30. – P. 16905–16929. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11356-022-24879-5>. – Текст : электронный.

218. Liu, T. Sustainability considerations of green buildings: a detailed overview on current advancements and future considerations / T. Liu, L. Chen, M. Yang, M. Sandanayake, P. Miao, Y. Shi, P.-S. Yap // *Sustainability.* – 2022. – Vol. 14. – P. 14393. – URL: <https://doi.org/10.3390/su142114393>. – Текст : электронный.

219. Thomas, B.S. Green concrete partially comprised of rice husk ash as a supplementary cementitious material – a comprehensive review / B.S. Thomas //

Renew. Sustain. Energy Rev. – 2018. – Vol. 82. – P. 3913–3923. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.081>. – Текст : электронный.

220. Chen, J. Research progress of wheat straw and rice straw cement-based building materials in China / J. Chen, E.M.A. Elbashiry, T. Yu, Y. Ren, Z. Guo, S. Liu // Mag. Concr. Res. – 2018. – Vol. 70. – P. 84–95. – URL: <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00064>. – Текст : электронный.

221. Amin, M. Effect of rice straw ash and palm leaf ash on the properties of ultrahigh-performance concrete / M. Amin, B.A. Tayeh, M.A. Kandil, I.S. Agwa, M.F. Abdelmagied // Case Stud. Constr. Mater. – 2022. – Vol. 17. – P. e01266. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01266>. – Текст : электронный.

222. Use of recycled concrete aggregates in production of green cement-based concrete composites: A review / N. Makul, R. Fediuk, M. Amran [et al.] // Crystals. – 2021. – Vol. 11, No. 3. – P. 1-35. – DOI 10.3390/cryst11030232. – EDN MPHVGs. – Текст : непосредственный.

223. Idicula, M. A study of the mechanical properties of randomly oriented short banana and sisal hybrid fiber reinforced polyester composites / M. Idicula, N.R. Neelakantan, Z. Oommen, K. Joseph, S. Thomas // J. Appl. Polym. Sci. – 2005. – Vol. 96, no. 5. – P. 1699–1709. – URL: <https://doi.org/10.1002/app.21636>. – Текст : электронный.

224. Saba, N. Recent advances in epoxy resin, natural fiber-reinforced epoxy composites and their applications / N. Saba, M. Jawaid, O.Y. Alothman, M. Paridah, A. Hassan // J. Reinforc. Plast. Compos. – 2016. – Vol. 35, no. 6. – P. 447–470. – URL: <https://doi.org/10.1177/0731684415618459>. – Текст : электронный.

225. Farooqi, M.U. A study on natural fibre reinforced concrete from materials to structural applications / M.U. Farooqi, M. Ali // Arabian J. Sci. Eng. – 2023. – Vol. 48. – P. 4471–4491. – URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06977-1>. – Текст : электронный.

226. Hamada, H.M. Application of natural fibres in cement concrete: a critical review / H.M. Hamada, J. Shi, M.S. Al Jawahery, A. Majdi, S.T. Yousif, G. Kaplan

// Mater. Today Commun. – 2023. – Vol. 35. – P. 105833. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105833>. – Текст : электронный.

227. Alomayri, T. Effect of plant fiber type and content on the strength and durability performance of high-strength concrete / T. Alomayri, B. Ali // Construct. Build. Mater. – 2023. – Vol. 394. – P. 132166. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132166>. – Текст : электронный.

228. Martinelli, F.R.B. A review of the use of coconut fiber in cement composites / F.R.B. Martinelli, F.R.C. Ribeiro, M.T. Marvila, S.N. Monteiro, FdCG. Filho, ARGd Azevedo // Polymers. – 2023. – Vol. 15. – P. 1309. – URL: <https://doi.org/10.3390/polym15051309>. – Текст : электронный.

229. Moujoud, Z. Geopolymer composites reinforced with natural Fibers: a review of recent advances in processing and properties / Z. Moujoud, S. Sair, H. Ait Ousaleh, I. Ayouch, A. El Bouari, O. Tanane // Construct. Build. Mater. – 2023. – Vol. 388. – P. 131666. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131666>. – Текст : электронный.

230. Dhasmana, A. Long-term mechanical characteristics of fibre reinforced metakaolin-based geopolymer concrete: a review / A. Dhasmana, S.P. Singh // Mater. Today: Proc. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.030>. – Текст : электронный.

231. Rajendran, M. Review on the hybridized application of natural fiber in the development of geopolymer concrete / M. Rajendran, K. Bakthavatchalam, S. Leela Bharathi // J. Nat. Fibers. – 2023. – Vol. 20. – P. 2178578. – URL: <https://doi.org/10.1080/15440478.2023.2178578>. – Текст : электронный.

232. Binici, H. The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production / H. Binici, O. Aksogan, A. Dincer, E. Luga, M. Eken, O. Isikaltun // Therm. Sci. Eng. Prog. – 2020. – Vol. 18. – P. 100567. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100567>. – Текст : электронный.

233. Lau, K-t. Properties of natural fibre composites for structural engineering applications / K-t. Lau, P-y. Hung, M.-H. Zhu, D. Hui // Compos. B Eng. – 2018. –

Vol. 136. – P. 222–233. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.10.038>.
– Текст : электронный.

234. Ahmad, M.R., Chen, B., Haque, M.A., Saleem Kazmi, S.M., Munir, M.J., 2021. Development of plant-concrete composites containing pretreated corn stalk bio- Ahmad, M.R. Development of plant-concrete composites containing pretreated corn stalk bio- aggregates and different type of binders / M.R. Ahmad, B. Chen, M.A. Haque, S.M. Saleem Kazmi, M.J. Munir // Cement Concr. Compos. – 2021. – Vol. 121. – P. 104054. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104054>. – Текст : электронный.

235. Velandia, D.F. Effect of mix design inputs, curing and compressive strength on the durability of Na₂SO₄-activated high volume fly ash concretes / D.F. Velandia, C.J. Lynsdale, J.L. Provis, F. Ramirez // Cement Concr. Compos. – 2018. – Vol. 91. – P. 11–20. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.028>. – Текст : электронный.

236. Lahououi, M. Investigation of fiber surface treatment effect on thermal, mechanical and acoustical properties of date palm fiber-reinforced cementitious composites / M. Lahououi, R. Ben Arfi, M. Fois, L. Ibos, A. Ghorbal // Waste and Biomass Valorization. – 2020. – Vol. 11. – P. 4441–4455. – URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00745-3>. – Текст : электронный.

237. Oancea, I. Considerations on sound absorption coefficient of sustainable concrete with different waste replacements / I. Oancea, C. Bujoreanu, M. Budescu, M. Benchea, C.M. Grădinaru // J. Clean. Prod. – 2018. – Vol. 203. – P. 301–312. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.273>. – Текст : электронный.

238. Yang, T. Sound absorption properties of natural fibers: a review / T. Yang, L. Hu, X. Xiong, M. Petru, M.T. Noman, R. Mishra, J. Militký // Sustainability. – 2020. – Vol. 12. – P. 8477. – URL: <https://doi.org/10.3390/su12208477>. – Текст : электронный.

239. Pachla, E.C. Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites / E.C. Pachla, D.B. Silva, K.J. Stein, E. Marangon,

W. Chong // Construct. Build. Mater. – 2021. – Vol. 283. – P. 122770. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>. – Текст : электронный.

240. Farooqi, M.U. Effect of pre-treatment and content of wheat straw on energy absorption capability of concrete / M.U. Farooqi, M. Ali // Construct. Build. Mater. – 2019. – Vol. 224. – P. 572–583. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.086>. – Текст : электронный.

241. Binici, H. The possibility of vermiculite, sunflower stalk and wheat stalk using for thermal insulation material production / H. Binici, O. Aksogan, A. Dincer, E. Luga, M. Eken, O. Isikaltun // Therm. Sci. Eng. Prog. – 2020. – Vol. 18. – P. 100567. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100567>. – Текст : электронный.

242. Jiang, D. Effect of modification methods on water absorption and strength of wheat straw fiber and its cement-based composites / D. Jiang, S. Lv, D. Jiang, H. Xu, H. Kang, X. Song, S. He // J. Build. Eng. – 2023. – Vol. 71. – P. 106466. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106466>. – Текст : электронный.

243. Farooqi, M.U. Effect of fibre content on compressive strength of wheat straw reinforced concrete for pavement applications / M.U. Farooqi, M. Ali // IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. – 2018. – Vol. 422. – P. 012014. – URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/422/1/012014>. – Текст : электронный.

244. Suhail, M.A. Advances in applications of cereal crop residues in green concrete technology for environmental sustainability: a review / M.A. Suhail, S. Shrivastava, K. Paritosh, N. Pareek, A.A. Kovalev, D.A. Kovalev, Y.V. Litt, V. Panchenko, V. Bolshev, V. Vivekanand // Agriculture. – 2022. – Vol. 12. – P. 1266. – URL: <https://doi.org/10.3390/agriculture12081266>. – Текст : электронный.

245. Farooqi, M.U. A study on natural fibre reinforced concrete from materials to structural applications / M.U. Farooqi, M. Ali // Arabian J. Sci. Eng. – 2022. – Vol. 48. – P. 4471–4491. – URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06977-1>. – Текст : электронный.

246. Ataie, F. Influence of rice straw fibers on concrete strength and drying shrinkage / F. Ataie // Sustainability. – 2018. – Vol. 10. – P. 2445. – URL: <https://doi.org/10.3390/su10072445>. – Текст : электронный.

247. Tayeh, B.A. Recycling of rice husk waste for a sustainable concrete: a critical review / B.A. Tayeh, R. Alyousef, H. Alabduljabbar, A. Alaskar // J. Clean. Prod. – 2021. – Vol. 312. – P. 127734. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127734>. – Текст : электронный.

248. Pachla, E.C. Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites / E.C. Pachla, D.B. Silva, K.J. Stein, E. Marangon, W. Chong // Construct. Build. Mater. – 2021. – Vol. 283. – P. 122770. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>. – Текст : электронный.

249. Chabannes, M. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: an innovative application / M. Chabannes, J.-C. B'en'ezet, L. Clerc, E. Garcia-Diaz // Construct. Build. Mater. – 2014. – Vol. 70. – P. 428–438. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025>. – Текст : электронный.

250. Yu, X. Strength, microstructure, and thermal conductivity of the insulation wallboards prepared with rice husk fiber and recycled concrete aggregates / X. Yu, L. Sun // PLoS One. – 2018. – Vol. 13. – P. e0203527. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203527>. – Текст : электронный.

251. Yuzer, N. Influence of raw rice husk addition on structure and properties of concrete / N. Yuzer, Z. Cinar, F. Akoz, H. Biricik, Y. Yalcin Gurkan, N. Kabay, A.B. Kizilkanat // Construct. Build. Mater. – 2013. – Vol. 44. – P. 54–62. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.070>. – Текст : электронный.

252. Winarno, S. Comparative strength and cost of rice husk concrete block / S. Winarno // MATEC Web Conf. – 2019. – Vol. 280. – P. 04002. – URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201928004002>. – Текст : электронный.

253. Winarno, S. Preliminary study on hand-cast lightweight concrete block using raw rice husk as aggregate / S. Winarno // IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.

– 2021. – Vol. 933. – P. 012005. – URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/933/1/012005>. – Текст : электронный.

254. Endale, S.A. Rice husk ash in concrete / S.A. Endale, W.Z. Taffese, D.-H. Vo, M.D. Yehualaw // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – P. 137. – URL: <https://doi.org/10.3390/su15010137>. – Текст : электронный.

255. Yuzer, N. Influence of raw rice husk addition on structure and properties of concrete / N. Yuzer, Z. Cinar, F. Aköz, H. Biricik, Y. Yalcin Gurkan, N. Kabay, A.B. Kizilkanat // Construct. Build. Mater. – 2013. – Vol. 44. – P. 54–62. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.070>. – Текст : электронный.

256. Althoey, F. Impact of sulfate activation of rice husk ash on the performance of high strength steel fiber reinforced recycled aggregate concrete / F. Althoey, O. Zaid, J. de-Prado-Gil, C. Palencia, E. Ali, I. Hakeem, R. Martínez-García // J. Build. Eng. – 2022. – Vol. 54. – P. 104610. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104610>. – Текст : электронный.

257. Danso, H. Effect of rice husk on the mechanical properties of cement-based mortar / H. Danso // J. Inst. Eng.: Series D. – 2020. – Vol. 101. – P. 205–213. – URL: <https://doi.org/10.1007/s40033-020-00228-z>. – Текст : электронный.

258. Liu, C. Recycled aggregate concrete with the incorporation of rice husk ash: mechanical properties and microstructure / C. Liu, W. Zhang, H. Liu, C. Zhu, Y. Wu, C. He, Z. Wang // Construct. Build. Mater. – 2022. – Vol. 351. – P. 128934. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128934>. – Текст : электронный.

259. Farhan, K.Z. Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: a review / K.Z. Farhan, M.A.M. Johari, R. Demirbog̃a // J. Build. Eng. – 2021. – Vol. 44. – P. 102628. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102628>. – Текст : электронный.

260. Hakeem, I.Y. Effect of using a combination of rice husk and olive waste ashes on high-strength concrete properties / I.Y. Hakeem, I.S. Agwa, B.A. Tayeh, M.H. Abd-Elrahman // Case Stud. Constr. Mater. – 2022. – Vol. 17. – P. e01486. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01486>. – Текст : электронный.

261. Kannan, V. Strength and durability performance of self compacting concrete containing self-combusted rice husk ash and metakaolin / V. Kannan // *Construct. Build. Mater.* – 2018. – Vol. 160. – P. 169–179. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.043>. – Текст : электронный.

262. Liu, C. Recycled aggregate concrete with the incorporation of rice husk ash: mechanical properties and microstructure / C. Liu, W. Zhang, H. Liu, C. Zhu, Y. Wu, C. He, Z. Wang // *Construct. Build. Mater.* – 2022. – Vol. 351. – P. 128934. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128934>. – Текст : электронный.

263. Zhang, W. Impact of rice husk ash on the mechanical characteristics and freeze–thaw resistance of recycled aggregate concrete / W. Zhang, H. Liu, C. Liu // *Appl. Sci.* – 2022. – Vol. 12. – P. 12238. – URL: <https://doi.org/10.3390/app122312238>. – Текст : электронный.

264. Kouta, N. Fracture behavior of flax fibers reinforced earth concrete / N. Kouta, J. Saliba, N. Saiyouri // *Eng. Fract. Mech.* – 2021. – Vol. 241. – P. 107378. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107378>. – Текст : электронный.

265. Rahimi, M. Effectiveness of treated flax fibers in improving the early age behavior of high-performance concrete / M. Rahimi, O.A. Hisseine, A. Tagnit-Hamou // *J. Build. Eng.* – 2022. – Vol. 45. – P. 103448. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103448>. – Текст : электронный.

266. Imanzadeh, S. Ductility analysis of vegetal-fiber reinforced raw earth concrete by mixture design / S. Imanzadeh, A. Jarno, A. Hibouche, A. Bouarar, S. Taibi // *Construct. Build. Mater.* – 2020. – Vol. 239. – P. 117829. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117829>. – Текст : электронный.

267. Dai, G. Conversion of skin collagen fibrous material waste to an oil sorbent with pH-responsive switchable wettability for high-efficiency separation of oil/water emulsions / G. Dai, Z. Zhang, W. Du, Z. Li, W. Gao, L. Li // *J. Clean. Prod.* – 2019. – Vol. 226. – P. 18–27. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.287>. – Текст : электронный.

268. Hamada, H.M. Application of natural fibres in cement concrete: a critical review / H.M. Hamada, J. Shi, M.S. Al Jawahery, A. Majdi, S.T. Yousif, G. Kaplan // *Mater. Today Commun.* – 2023. – Vol. 35. – P. 105833. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.105833>. – Текст : электронный.

269. Khelifi, H. Mechanical enhancement of cement-stabilized soil by flax fibre reinforcement and extrusion processing / H. Khelifi, T. Lecompte, A. Perrot, G. Ausias // *Mater. Struct.* – 2016. – Vol. 49. – P. 1143–1156. – URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0564-z>. – Текст : электронный.

270. Perrot, A. Structural build-up of rigid fiber reinforced cement-based materials / A. Perrot, T. Lecompte, P. Estell'e, S. Amziane // *Mater. Struct.* – 2013. – Vol. 46. – P. 1561–1568. – URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9997-9>. – Текст : электронный.

271. Wang, Q. Artificial intelligence-based estimation of ultra-high-strength concrete's flexural property / Q. Wang, A. Hussain, M.U. Farooqi, A.F. Deifalla // *Case Stud. Constr. Mater.* – 2022. – Vol. 17. – P. e01243. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01243>. – Текст : электронный.

272. Page, J. Enhancement of the long-term mechanical performance of flax fiber-reinforced cementitious composites by using alternative binders / J. Page, F. Khadraoui, M. Gomina, M. Boutouil // *J. Build. Eng.* – 2021. – Vol. 40. – P. 102323. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102323>. – Текст : электронный.

273. Ali, B. Investigation of physical, strength, and ductility characteristics of concrete reinforced with banana (*Musaceae*) stem fiber / B. Ali, M. Azab, H. Ahmed, R. Kurda, M.H. El Ouni, A.B. Elhag // *J. Build. Eng.* – 2022. – Vol. 61. – P. 105024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.105024>. – Текст : электронный.

274. Saad, M. Improving the brittle behavior of high strength concrete using banana and palm leaf sheath fibers / M. Saad, I.S. Agwa, B. Abdelsalam Abdelsalam, M. Amin // *Mech. Adv. Mater. Struct.* – 2022. – Vol. 29. – P. 564–573. – URL: <https://doi.org/10.1080/15376494.2020.1780352>. – Текст : электронный.

275. Shen, Z. Compressive strength evaluation of ultra-high-strength concrete by machine learning / Z. Shen, A.F. Deifalla, P. Kaminski, A. Dyczko // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – P. 3523. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15103523>. – Текст : электронный.

276. Ali, B. Investigation of physical, strength, and ductility characteristics of concrete reinforced with banana (Musaceae) stem fiber / B. Ali, M. Azab, H. Ahmed, R. Kurda, M.H. El Ouni, A.B. Elhag // *J. Build. Eng.* – 2022. – Vol. 61. – P. 105024. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105024>. – Текст : электронный.

277. Afraz, A. Effect of banana fiber on flexural properties of fiber reinforced concrete for sustainable construction / A. Afraz, M. Ali // *Engineering Proceedings*. – 2021. – Vol. 12. – P. 63. – URL: <https://doi.org/10.3390/engproc2021012063>. – Текст : электронный.

278. Bhaskar, D. Behaviour of fibre length in banana fibre reinforced thermoplastic composites under high velocity impact performance / D. Bhaskar, G. Suresh, R. Ganesamoorthy, T. Srinivasan, B.V. Dharmendra, C.M. Meenakshi, K. Selva Ganapathy // *Recent Advances in Materials and Modern Manufacturing*. – 2022. – P. 1029–1037. – Текст : электронный.

279. Sivaranjana, P. A brief review on mechanical and thermal properties of banana fiber based hybrid composites / P. Sivaranjana, V. Arumugaprabu // *SN Appl. Sci.* – 2021. – Vol. 3. – P. 176. – URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04216-0>. – Текст : электронный.

280. Darsana, P. Development of coir-fibre cement composite roofing tiles / P. Darsana, R. Abraham, A. Joseph, A. Jasheela, P.R. Binuraj, J. Sarma // *Procedia Technology*. – 2016. – Vol. 24. – P. 169–178. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.024>. – Текст : электронный.

281. More, F.M.D.S. Impact of fibres on the mechanical and durable behaviour of fibre-reinforced concrete / F.M.D.S. More, S.S. Subramanian // *Buildings*. – 2022. – Vol. 12. – P. 1436. – URL: <https://doi.org/10.3390/buildings1209143>. – Текст : электронный.

282. Ramli, M. Strength and durability of coconut-fiber- reinforced concrete in aggressive environments / M. Ramli, W.H. Kwan, N.F. Abas // Construct. Build. Mater. – 2013. – Vol. 38. – P. 554–566. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.002>. – Текст : электронный.

283. Ahmad, W. Effect of coconut fiber length and content on properties of high strength concrete / W. Ahmad, S.H. Farooq, M. Usman, M. Khan, A. Ahmad, F. Aslam, R.A. Yousef, H.A. Abduljabbar, M. Sufian // Materials. – 2020. – Vol. 13. – P. 1075. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma13051075>. – Текст : электронный.

284. Ahmad, J. Mechanical and durability characteristics of sustainable coconut fibers reinforced concrete with incorporation of marble powder / J. Ahmad, O. Zaid, M.S. Siddique, F. Aslam, H. Alabduljabbar, K.M. Khedher // Mater. Res. Express. – 2021. – Vol. 8. – P. 075505. – URL: <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ac10d3>. – Текст : электронный.

285. Jamshaid, H. Natural cellulosic fiber reinforced concrete: influence of fiber type and loading percentage on mechanical and water absorption performance / H. Jamshaid, R.K. Mishra, A. Raza, U. Hussain, M.L. Rahman, S. Nazari, V. Chandan, M. Muller, R. Choteborsky // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 874. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15030874>. – Текст : электронный.

286. Rumbayan, R. A study into flexural, compressive and tensile strength of coir-concrete as sustainable building material / R. Rumbayan, T. Sudarno, A.J.M.W.C. Ticoalu // MATEC Web of Conferences. – 2019. – Vol. 258. – P. 01011. – URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201925801011>. – Текст : электронный.

287. Ahmad, J. Mechanical and durability performance of coconut fiber reinforced concrete: a state-of-the-art review / J. Ahmad, A. Majdi, A. Al-Fakih, A.F. Deifalla, F. Althoey, M.H. El Ouni, M.A. El-Shorbagy // Materials. – 2022. – Vol. 15. – P. 3601. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15103601>. – Текст : электронный.

288. Chin, S.C. External strengthening of reinforced concrete beam with opening by bamboo fiber reinforced composites / S.C. Chin, K.F. Tee, F.S. Tong,

S.I. Doh, J. Gimbun // *Mater. Struct.* – 2020. – Vol. 53. – P. 141. – URL: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01572-y>. – Текст : электронный.

289. Hamzeh, Y. Study on the effects of white rice husk ash and fibrous materials additions on some properties of fiber–cement composites / Y. Hamzeh, K.P. Ziabari, J. Torkaman, A. Ashori, M. Jafari // *J. Environ. Manag.* – 2013. – Vol. 117. – P. 263–267. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.002>. – Текст : электронный.

290. Ede, A.N. Effects of bamboo fibers and limestone powder on fresh properties of self-compacting concrete / A.N. Ede, O. Oshogbunu, O. Olofinnade, K. Jolayemi, S.O. Oyebisi, O.G. Mark, P.O. Awoyera // *Proceedings of 10th Interdependence between Structural Engineering and Construction Management, ISEC10.* – 2019. – Текст : электронный.

291. Sheng, Y. Laboratory investigation on the use of bamboo fiber in asphalt mixtures for enhanced performance / Y. Sheng, B. Zhang, Y. Yan, H. Li, Z. Chen, H. Chen // *Arabian J. Sci. Eng.* – 2019. – Vol. 44. – P. 4629–4638. – URL: <https://doi.org/10.1007/s13369-018-3490-x>. – Текст : электронный.

292. Li, Z. Mechanical properties of engineered bamboo boards for glulam structures / Z. Li, H.Z. He, Z.M. Cai, R. Wang, Y. Xiao // *J. Mater. Civ. Eng.* – 2021. – Vol. 33. – P. 04021058 – URL: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003657](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003657). – Текст : электронный.

293. Yusra, A. Use of bamboo fiber on the relationship between compressive strength and split tensile strength of high strength concrete / A. Yusra, T. Triwulan, M. Safriani, M. Ikhsan // *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* – 2020. – Vol. 933. – P. 012010 – URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/933/1/012010>. – Текст : электронный.

294. Bashir, A. Analysis of Bamboo fibre reinforced beam / A. Bashir, C. Gupta, M. Abubakr, S. Abba // *J. Steel Struct. Constr.* – 2018. – Vol. 4. – P. 2–7. – URL: <https://doi.org/10.4172/2472-0437.1000146>. – Текст : электронный.

295. Ramesh, M. Bamboo Fiber Reinforced Concrete Composites / M. Ramesh, C. Deepa, A. Ramanan // *Bamboo Fiber Reinforced Polymer*

Composites / eds. M. Jawaid, S. Mavinkere Rangappa, S. Siengchin. – Singapore : Springer Singapore, 2021. – P. 127–145. – URL: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8489-3_8. – Текст : электронный.

296. Alam, M.A. Shear strengthening of reinforced concrete beam using natural fibre reinforced polymer laminates / M.A. Alam, K. Al Riyami // *Construct. Build. Mater.* – 2018. – Vol. 162. – P. 683–696. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.011>. – Текст : электронный.

297. Pachla, E.C. Sustainable application of rice husk and rice straw in cellular concrete composites / E.C. Pachla, D.B. Silva, K.J. Stein, E. Marangon, W. Chong // *Construct. Build. Mater.* – 2021. – Vol. 283. – P. 122770 – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122770>. – Текст : электронный.

298. Chabannes, M. Use of raw rice husk as natural aggregate in a lightweight insulating concrete: an innovative application / M. Chabannes, J.-C. B'en'ezet, L. Clerc, E. Garcia-Diaz // *Construct. Build. Mater.* – 2014. – Vol. 70. – P. 428–438. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.025>. – Текст : электронный.

299. Yu, X. Strength, microstructure, and thermal conductivity of the insulation wallboards prepared with rice husk fiber and recycled concrete aggregates / X. Yu, L. Sun // *PLoS One*. – 2018. – Vol. 13. – P. e0203527. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203527>. – Текст : электронный.

300. Jamshaid, H. Natural cellulosic fiber reinforced concrete: influence of fiber type and loading percentage on mechanical and water absorption performance / H. Jamshaid, R.K. Mishra, A. Raza, U. Hussain, M.L. Rahman, S. Nazari, V. Chandan, M. Muller, R. Choteborsky // *Materials*. – 2022. – Vol. 15. – P. 874. – URL: <https://doi.org/10.3390/ma15030874>. – Текст : электронный.

301. Huner, U. Effect of water absorption on the mechanical properties of flax fiber reinforced epoxy composites / U. Huner // *Advances in Science and Technology Research Journal*. – 2015. – Vol. 9. – P. 1–6. – URL: <https://doi.org/10.12913/22998624/2357>. – Текст : электронный.

302. Page, J. Multi-physical properties of a structural concrete incorporating short flax fibers / J. Page, F. Khadraoui, M. Boutouil, M. Gomina // *Construct. Build. Mater.* – 2017. – Vol. 140. – P. 344–353. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.124>. – Текст : электронный.

303. Строить из отходов. – Текст : электронный // *Деловой Петербург*. – 2023. – 12 апр. – URL: <https://www.dp.ru/a/2023/04/12/Stroit-iz-othodov> (дата обращения: 14.09.2025).

304. Применение вторичных ресурсов. – Текст : электронный // *News.solidwaste.ru*. – 2022. – URL: <https://news.solidwaste.ru/wp-content/uploads/2022/11/Primenenie-vtorichnyh-resursov-.pdf> (дата обращения: 14.09.2025).

305. Как строительный мусор становится ценным ресурсом. – Текст : электронный // *Коммерсантъ*. – 2022. – 24 мая. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/5413094> (дата обращения: 14.09.2025).

306. Sentzas, K. A hybrid life cycle analysis method for the environmental assessment of conventional building materials / K. Sentzas, T. Karastergios, D. Tsiamitros // *EinB2017—6th International Conference “Energy In Buildings”*. – 2017.

307. Serres, N. Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment / N. Serres, S. Braymand, F. Feugeas // *J Build Eng.* – 2016. – Vol. 5. – P. 24–33. – URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.11.004>. – Текст : электронный.

308. Yazdanbakhsh, A. Comparative LCA of concrete with natural and recycled coarse aggregate in the New York City area / A. Yazdanbakhsh, L.C. Bank, T. Baez // *Int J Life Cycle Assess.* – 2018. – Vol. 23. – P. 1163–1173. – URL: <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1360-5>. – Текст : электронный.

309. Weil, M. Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values / M. Weil, U. Jeske, L. Schebek // *Waste Manage Res.* – 2006. – Vol. 24. – P. 197–206. – URL: <https://doi.org/10.1177/0734242X06063686>. – Текст : электронный.

310. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. – Введ. 2016-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2014. – 22 с. – Текст : непосредственный.

311. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. – Введ. 1995-01-01. – Москва: Стандартинформ, 1993. – 21 с. – Текст : непосредственный.

312. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. – Введ. 1986-07-01. – Москва: Стандартинформ, 1985. – 12 с. – Текст : непосредственный.

313. ГОСТ Р 51568-99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. – Введ. 2000-01-01. – Москва: Стандартинформ, 1999. – 8 с. – Текст : непосредственный.

314. ГОСТ 10180—2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 18 с. – Текст : непосредственный.

315. ГОСТ 17624-2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – Введ. 2022-01-01. – Москва: Стандартинформ, 2021. – 10 с. – Текст : непосредственный.

316. МДС 62-2.01. Методические рекомендации по контролю прочности бетона монолитных конструкций ультразвуковым методом способом поверхностного прозвучивания. – Введ. 2001-01-01. – Москва: ПНИИИС, 2001. – 23 с. – Текст : непосредственный.

317. ГОСТ Р ИСО 22309-2015. Количественный анализ с использованием энергодисперсионной спектроскопии для элементов с атомным номером от 11 (Na) и выше. – Введ. 2016-12-01. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 16 с. – Текст : непосредственный.

318. Корнилова, А.В. Практическое руководство по обработке экспериментальных данных / А.В. Корнилова, Тет Паинг, Чжо Заяр, А.И. Селищев. – Москва : Ridero, [б. г.]. – 187 с. – Текст : непосредственный.

319. ГОСТ 10181—2000. Смеси бетонные. Методы испытаний. – Введ. 2001-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2000. – 24 с. – Текст : непосредственный.

320. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. – Введ. 2013-07-01. – Москва: Стандартинформ, 2012. – 12 с. – Текст : непосредственный.

321. Перевертов, В. Классификации наноматериалов для традиционных и аддитивных технологий в системе транспортного машиностроения / В. Перевертов, Н.А. Кузин, Н.К. Юрков // НиКСС. – 2022. – № 2 (38). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klassifikatsii-nanomaterialov-dlya-traditsionnyh-i-additivnyh-tehnologiy-v-sisteme-transportnogo-mashinostroeniya> (дата обращения: 14.09.2025). – Текст : электронный.

322. Валиев, Р.Д. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства / Р.Д. Валиев, И.В. Алекандров. – Москва : ИКЦ “Академкнига”, 2007. – 398 с. – Текст : непосредственный.

323. Перов, В.А. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / В.А. Перов, Е.Е. Андреев, Л.Ф. Биленко. – Москва : Недра, 1990. – 400 с. – Текст : непосредственный.

324. Болдин, А.Н. Измельчение огнеупорных глин литейного производства с целью получения порошков фракцией наноразмеров / А.Н. Болдин, А.Н. Задиранов, О.Г. Плотникова // Литье Украины. – 2011. – № 5. – С. 17-20. – Текст : непосредственный.

325. Матвеев, И. В. Механохимическая активация и выбор режимов виброобработки футеровочных материалов / И. В. Матвеев, А. А. Соколов // Сборник научных докладов VIII Международной научно-практической конференции под эгидой ЮНЕСКО. – Москва, 2009. – С. 59-65. – Текст : непосредственный.

326. Вареных, Н.М. Химико-технологические агрегаты механической обработки дисперсных материалов / Н.М. Вареных, А.Н. Веригин,

В.Г. Джангирян. – Санкт-Петербург : Изд-во С.-Петербург. ун-та, 2002. – 481 с. – Текст : непосредственный.

327. Ушаков, А.В. Получение ультрадисперсных порошков в плазме дугового разряда низкого давления: дис. ... канд. техн. наук / Ушаков А.В. – Красноярск, 2002. – 135 с. – Текст : непосредственный.

328. Sabir, B.B. Metakaolin and calcined clays as pozzolans for concrete: a review / B.B. Sabir, S. Wild, J. Bai // Cement Concr. Compos. – 2001. – Vol. 23(6). – P. 441–454. – Текст : электронный.

329. Bai, J. Chloride ingress and strength loss in concrete with different PC–PFA–MK binder compositions exposed to synthetic seawater / J. Bai, S. Wild, B.B. Sabir // Cement Concr. Res. – 2003. – Vol. 33(3). – P. 353–362. – Текст : электронный.

330. Neville, A.M. Properties of Concrete / A.M. Neville. – Englewood Cliffs : Prentice Hall, 2005. – Текст : непосредственный.

331. Биленко, Л.Ф. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых / Л.Ф. Биленко. – Москва : Недра, 1990. – 400 с. – Текст : непосредственный.

332. Барский, М.Д. Фракционирование порошков / М.Д. Барский. – Москва : Недра, 1980. – 327 с. – Текст : непосредственный.

333. Несветаев, Г.В. О соотношении пределов прочности цементных бетонов на растяжение при изгибе и сжатии / Г.В. Несветаев, Т.Г. Кузьменко // ИВД. – 2023. – № 8 (104). – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/o-sootnoshenii-predelov-prochnosti-tsementnyh-betonov-na-rastyazhenie-pri-izgibe-i-szhatii> (дата обращения: 14.09.2025). – Текст : электронный.

334. Morsy, M.S. Development and characterization of nano-structured perlite- cementitious surface compounds / M.S. Morsy, H. Aglan // J. Mater. Sci. – 2007. – Vol. 42. – P. 196–202. – Текст : электронный.

335. Shih, J. Effect of nanosilica on characterization of Portland cement composite / J. Shih, T. Chang, T. Hsiao // Mater. Sci. Eng. A. – 2006. – Vol. 424. – P. 266–274. – Текст : электронный.

336. Shebl, S.S. Mechanical behavior of activated nano silicate filled cement binders / S.S. Shebl, L. Allie, M.S. Morsy, H.A. Aglan // J. Mater. Sci. – 2009. – Vol. 44. – P. 1600–1606. – Текст : электронный.
337. Li, X. Surface-modification in situ of nano-SiO₂ and its structure and tribological properties / X. Li, Z. Cao, Z. Zhang, H. Dang // Applied Surface Science. – 2006. – Vol. 252(22). – P. 7856-61. – Текст : электронный.
338. Givi, A.N. Influence of 15 and 80 nano-SiO₂ particles addition on mechanical and physical properties of ternary blended concrete incorporating rice husk ash / A.N. Givi, S.A. Rashid, F.N.A. Aziz, M.A.M. Salleh // Journal of Experimental Nanoscience. – 2013. – Vol. 8(1). – P. 1-18. – Текст : электронный.
339. Teichmann, T. Influence of the packing density of fine particles on structure, strength and durability of UHPC / T. Teichmann, M. Schmidt // First international symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany, 2004. – P. 313–323.
340. Monteiro, P.J.M. Designing concrete mixtures for strength, elastic modulus and fracture energy / P.J.M. Monteiro, P.R.L. Helene, S.H. Kang // Mater. Struct. – 1993. – Vol. 26(8). – P. 443–452. – URL: <https://doi.org/10.1007/BF02472804>. – Текст : электронный.
341. Shah, S.P. Structural properties of high strength concrete and its implications for precast prestressed concrete / S.P. Shah, S.H. Ahmad // PCI J. – 1985. – Vol. 6 (30). – P. 92–119. – Текст : электронный.
342. Вернигорова, В. Н. Химия в строительстве : монография / В. Н. Вернигорова, К. Н. Махамбетова. Том Ч.3. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. – 130 с. – ISBN 978-5-9282-1116-5. – EDN WGROVJ
343. Габидуллин, М.Г. Структурная организация цементного камня М.Г. Габидуллин, А.Ф. Хузин, Р.З. Рахимов, А.Н. Габидуллина, О.В. Стоянов. – URL: <file:///C:/Users/Polnis%20cor/Downloads/strukturnaya-organizatsiya-tsementnogo-kamna.pdf> (дата обращения: 14.09.2025). – Текст : электронный.

344. Khaloo, A. Influence of different types of nano-SiO₂ particles on properties of high-performance concrete / A. Khaloo, M.H. Mobini, P. Hosseini // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 113. – P. 188-201. – Текст : электронный.

345. Jarabo, R. Use of cellulose fibers from hemp core in fiber-cement production: effect on flocculation, retention, drainage and product properties / R. Jarabo, E. Fuente, M.C. Monte, H. Savastano, P. Mutjé, C. Negro // *Ind. Crops Prod.* – 2012. – Vol. 39. – P. 89–96. – Текст : электронный.

346. Faruk, O. Biocomposites reinforced with natural fibers / O. Faruk, A.K. Bledzki, H.S. Fink, M. Mohini Sain // *Prog. Polym. Sci.* – 2012. – Vol. 37. – P. 552–1596. – Текст : электронный.

347. СП 52-103-2007. Железобетонные монолитные конструкции зданий. – Введ. 2008-01-01. – Москва : Стандартинформ, 2007. – 56 с. – Текст : непосредственный.

348. Пронин, В.А. Введение в расчетную платформу ANSYS Workbench / В.А. Пронин, Д.В. Жигновская, В.А. Цветков. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2019. – Текст : непосредственный.

349. Андреев, Е.Е. Дробление, измельчение и подготовка сырья к обогащению : учебник / Е.Е. Андреев, О.Н. Тихонов. – Санкт-Петербург : [б. и.], 2007. – 439 с. – ISBN: 978-5-94211-308-7. – Текст : непосредственный.

350. Марюта, А.Н. Закономерности механики движения материала в барабанных мельницах / А.Н. Марюта // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. – 1986. – №3. – С. 18-26. – Текст : непосредственный.

351. Богданов, В.С. Шаровые барабанные мельницы / В.С. Богданов. – Белгород : БГТАСМ, 2002. – 258 с. – Текст : непосредственный.

352. He, X. Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials / X. He, X. Shi // In: *Transportation Research Record: J. Transp. Res. Board*, No. 2070, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, DC, 2008. – P. 13–21. – Текст : электронный.

353. Bentz, D.P. Limestone fillers to conserve cement in low w/cm concretes: an analysis based on powers' model / D.P. Bentz, E.F. Irassar, B. Bucher, W.J. Weiss // *Concr Int.* – 2009. – Vol. 31. – P. 41–6. – Текст : электронный.

354. Peng, Y. Dense packing properties of mineral admixtures in cementitious material / Y. Peng, S. Hu, Q. Ding // *Particuology.* – 2009. – Vol. 7(5). – P. 399–402. – Текст : электронный.

355. Вернигорова, В. Н. Химия в строительстве / В. Н. Вернигорова, К. Н. Махамбетова. Том Часть 2. – Пенза : Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, 2014. – 123 с. – ISBN 978-5-9282-1100-4. – EDN VTMPYD

356. Aziz, M.A. Prospects for natural fibre reinforced concretes in construction / M.A. Aziz, P. Paramasivam, S.L. Lee // *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.* – 1981. – Vol. 3 (2). – P. 123–132. – Текст : электронный.

357. Армирование элементов монолитных железобетонных зданий : пособие по проектированию / ФГУП «НИЦ «Строительство» НИИЖБ им. А.А. Гвоздева ЗАО «КТБ НИИЖБ». – Москва, 2007. – Текст : непосредственный.