



Российский университет
дружбы народов



РОССИЙСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
ДРУЖБЫ
НАРОДОВ



ИНЖЕНЕРНАЯ АКАДЕМИЯ

МОДИФИЦИРОВАНИЕ БЕТОНА ДИСПЕРСНЫМИ ПОРОШКАМИ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Специальность 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Аспирант: **Горшков Александр Сергеевич**

Научный руководитель: д.т.н., профессор **Малькова Марианна Юрьевна**

Москва, 2025

► **Актуальность темы исследования:** Современное развитие технологий гражданского и промышленного строительства сопровождается увеличением потребности в высокопрочных бетонах. Для повышения эксплуатационных характеристик бетонных смесей используются дорогостоящие добавки. Однако в строительной отрасли образуется значительное количество отходов, которые могут быть вовлечены в производственные процессы. В связи с этим актуальным направлением научных исследований является применение строительных отходов в качестве дисперсных модификаторов бетонных композиций.

Основные источники загрязнений антропогенного происхождения





► **Цель диссертационной работы** – исследование механических характеристик бетонов, модифицированных дисперсными порошками строительных отходов.

► **Задачи исследования:**

- комплексное изучение химического состава и физических свойств строительных отходов для применения к ним методов дезинтеграции с получением дисперсных порошков;
- исследование гранулометрического состава дисперсных порошков строительных отходов;
- оценка эффективности процессов формирования ДП и УДП при измельчения материалов;
- определение оптимальных параметров измельчения для получения частиц с высокой степенью дисперсности;
- разработка рецептур бетонных смесей, включающих дисперсные порошки строительных отходов в качестве модифицирующей добавки;
- испытания на прочность и упругость бетонов, модифицированных дисперсными порошками строительных отходов;
- установление зависимостей между гранулометрическим, химическим составом ДП и механическими характеристиками бетонов, полученных с использованием дисперсных порошков;
- разработка оптимальных составов бетонных смесей, армированных дисперсными порошками, полученными из строительных отходов, с учетом требований к прочности и долговечности конструкций;
- расчет строительных конструкций, изготовленных с использованием разработанных в диссертации бетонных смесей.



► **Положения, выносимые на защиту.**

1. Обоснование выбора природы и размера компонентов для модифицирования бетонной смеси, обеспечивающей создание бетона с улучшенными эксплуатационными свойствами.
2. Выявлены закономерности формирования дисперсных (ДП) и ультрадисперсных порошков (УДП), полученных из отходов строительной промышленности, с целью их использования в качестве модифицирующих компонентов бетонной смеси.
3. Результаты исследований химического и гранулометрического состава полученных дисперсных и ультрадисперсных порошков.
4. Результаты исследований кинетики формирования дисперсных порошков строительных отходов.
5. Метод определения оптимальных технологических параметров, обеспечивающих получение дисперсных порошков заданной фракции.
6. Результаты экспериментального исследования механических характеристик бетонов, содержащих в качестве армирующей добавки ДП строительных отходов.
7. Составы и свойства бетонных смесей, содержащих ДП строительных отходов в качестве модификаторов.





Научная новизна.

1. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность применения дисперсных материалов, полученных из строительных отходов, в качестве модифицирующей добавки в технологиях изготовления бетонов с повышенными эксплуатационными характеристиками. Установлено, что введение ДП в состав бетонной смеси обуславливает значительное улучшение физико-механических свойств бетона по сравнению с традиционными рецептурами.
 2. Исследованы закономерности формирования дисперсных (ДП) и ультрадисперсных (УДП) порошков, полученных путем механического измельчения отходов строительной промышленности, с целью их использования в качестве модификаторов бетонных композиций.
 3. Выявлены зависимости между гранулометрическим, химическим составом дисперсных порошков-модификаторов и механическими характеристиками бетонов, изготовленных с их использованием.
 4. Разработаны и изучены составы бетонных композиций, содержащих ДП строительных отходов фракцией $-0,026+0$ мм в концентрациях 10-50 % от массы цемента. Установлено, что такое содержание дисперсных порошков способствует уплотнению структуры бетона; оказывает микроармирующее действие на раствор; повышает прочностные и упругие характеристики полученных бетонов.
- 



Теоретическая и практическая значимость работы

1. Научно обоснована возможность использования ДП строительных отходов в качестве частичной замены цемента в составе бетонных смесей.
2. Проведена оптимизация регулируемых технологических параметров измельчения с целью получения дисперсных порошков заданной фракции.
3. Разработаны новые рецептуры бетонных смесей с добавлением ДП строительных отходов. Данные составы обеспечивают повышение прочности бетонов на сжатие на 13,9-86,6 %, упругости – на 42,6-88,0 % по сравнению с бетонами, изготовленными по традиционной технологии.
4. Определены оптимальные концентрации армирующих элементов в бетонной смеси. Установлено, что максимальные показатели прочности на сжатие и упругости бетонных образцов достигаются при использовании 20 % ДП от массы цемента, и составляют 46,112 МПа и 51,7 ГПа, соответственно.
5. Показано, что применение бетонных смесей с модифицирующей добавкой из ДП строительных отходов позволяет уменьшить стоимость бетона для получения плиты перекрытия на 20% и стоимость используемой арматуры на 48%. Масса плиты перекрытия на 23 % легче стандартной плиты. Масса арматуры на 36% легче, чем в стандартном исполнении. Что значительно уменьшает нагрузку на фундамент.

Исходные материалы

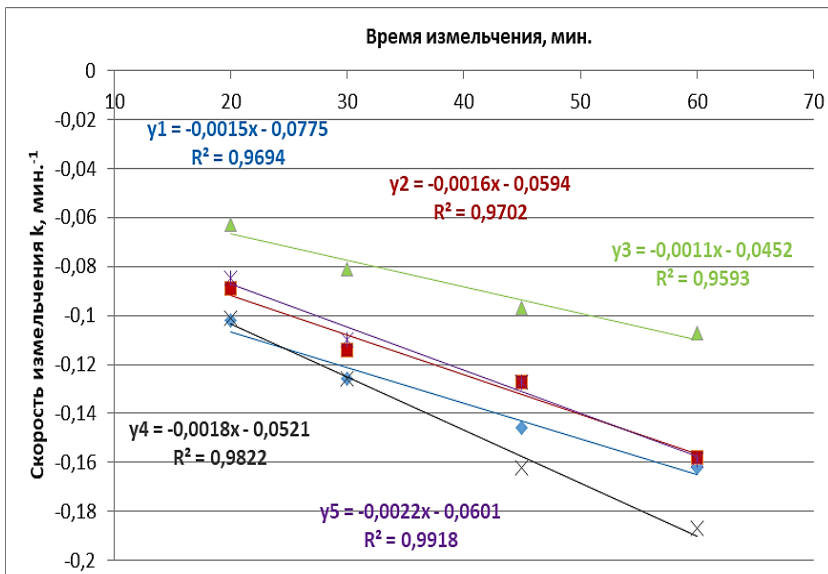
Облицовочный кирпич гладкий Браер 0,7 NF (образец №1), прочность на сжатие — до 19МПа.. ГОСТ Кирпич и камень керамический 530-2019	
Шамотный кирпич ШБ-5 (образец №2), прочность на сжатие — до 19МПа.. ГОСТ Кирпич и камень керамический 530-2019	
Облицовочный кирпич М 200 1NF (образец №3),), прочность на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

- Для модифицирования бетонной смеси с целью частичной замены цемента в состав бетонной смеси вводили измельченные отходы строительного кирпича различных марок

Химический состав ДП образцов строительных отходов

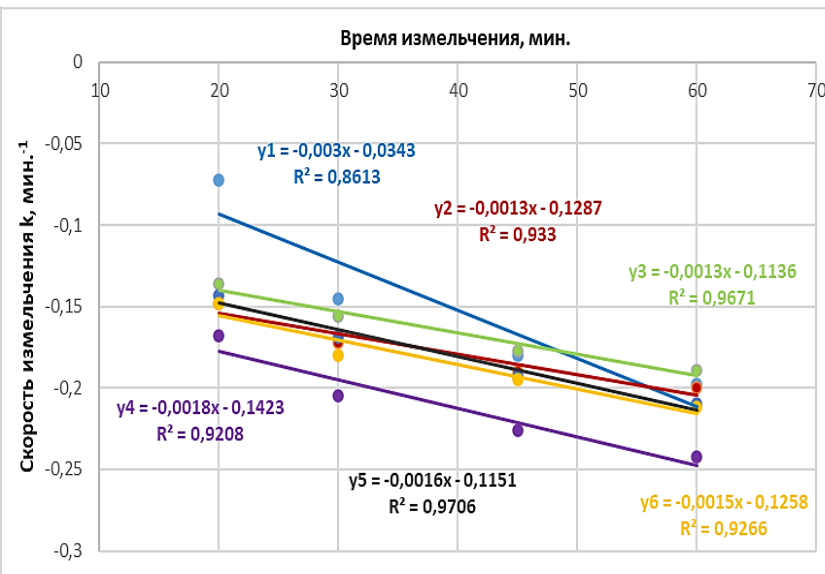
Содержание компонентов, %	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Сумма
ДП образца №1	0,6	1,0	12,0	59,0	3,2	1,2	1,2	6,1	15,8	100
ДП образца №2	0,2	0,4	37,7	46,5	1,9	0,8	2,1	0,0	10,4	100
ДП образца №3	0,9	1,2	15,4	61,7	4,2	1,5	1,4	0,4	13,2	100

Кинетика измельчения дисперсных порошков



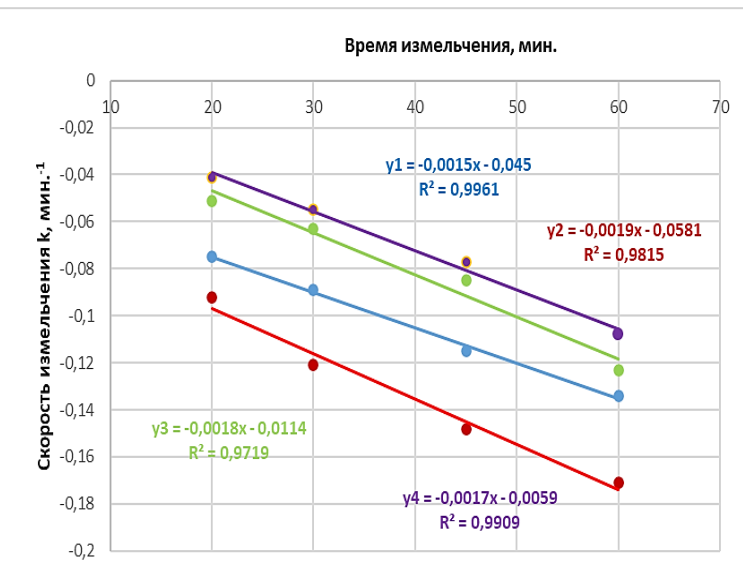
Зависимость коэффициента скорости измельчения ДП образца №1 от длительности измельчения.

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



Зависимость коэффициента скорости измельчения ДП образца №2 от длительности измельчения.

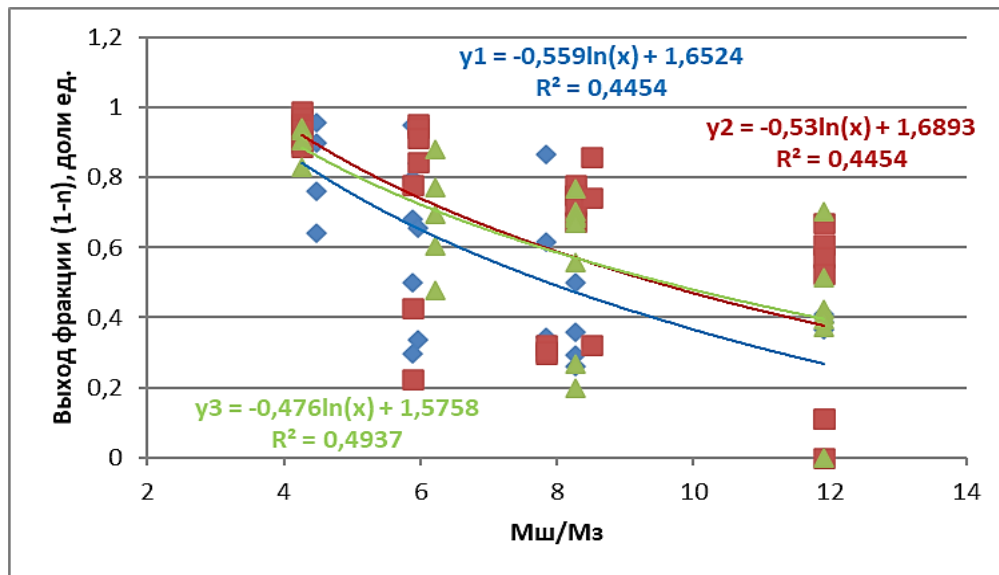
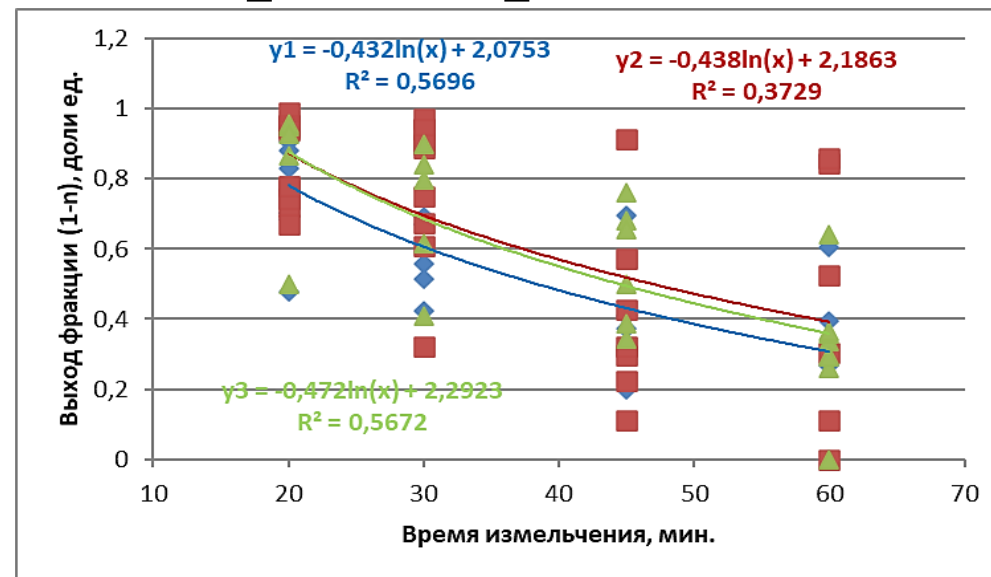
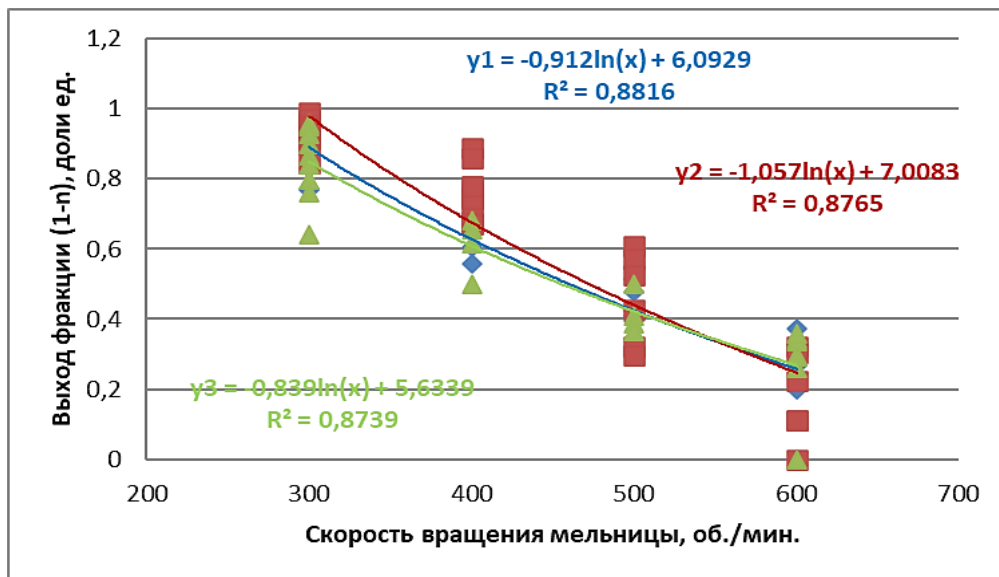
Условия измельчения: y_1 – 600об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,170;
 y_2 – 300об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,168;
 y_3 – 300об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,235;
 y_4 – 300об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,121;
 y_5 – 300об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,235;
 y_6 – 450об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,117



Зависимость коэффициента скорости измельчения ДП образца №3 от длительности измельчения.

Условия измельчения: y_1 – 600об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,170;
 y_2 – 600об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,127;
 y_3 – 300об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,168;
 y_4 – 300об./мин., $M_3/M_{ш}$ – 0,223

Оптимизация технологических параметров измельчения



Экспериментальные зависимости выхода фракции (-0,026+0 мм) от регулируемых технологических параметров.

$$Y = k\ln X + B, \text{ где}$$

Y – доля выхода фракции -0,026+0 мм;

k – постоянная скорости измельчения,

B – постоянная логарифмирования.

Оптимизация технологических параметров измельчения

(метод множественного регрессионного анализа Д.Б. Брандона)

- ▶ Критерий оптимизации: выход фракции $(-0,026+0 \text{ мм})$.
- ▶ Регулируемые параметры (X_i): X_1 – скорость вращения мельницы, об/мин.; X_2 – время измельчения, мин.; X_3 – соотношение масс мелющих тел и загрузки.

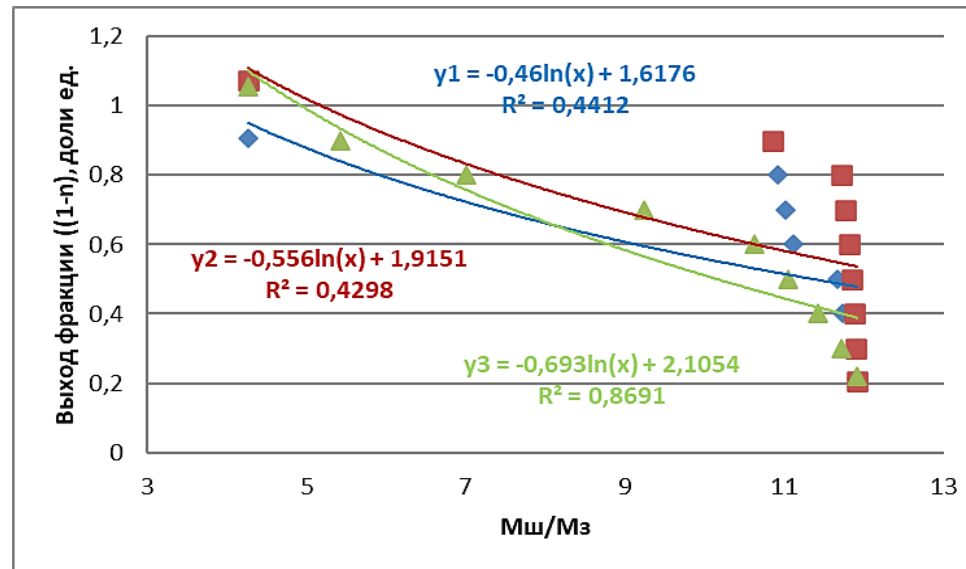
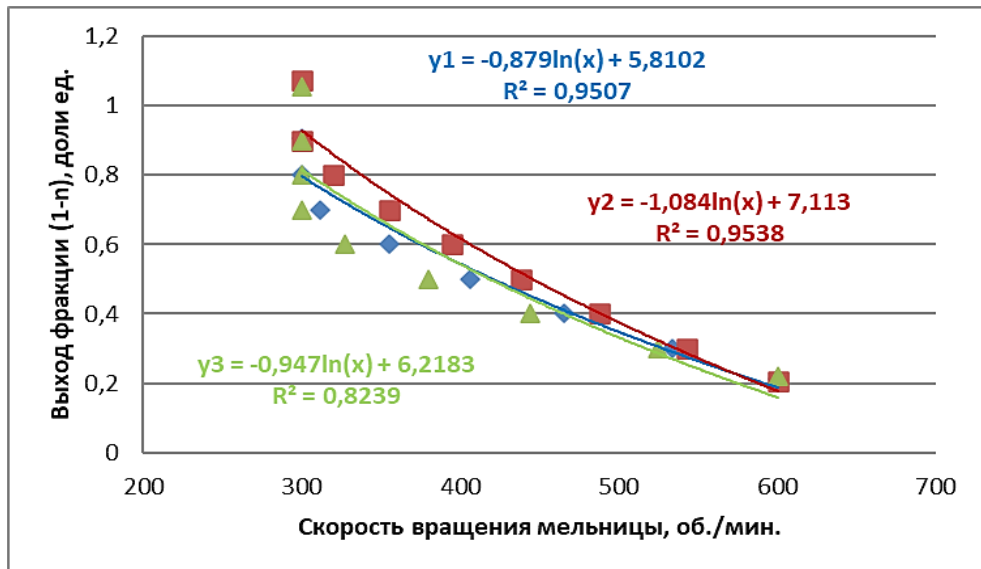
Вид уравнения	k_i	B_i	α	R^2	$F_{\text{эсп.}}$
Образец 1					
$f(X_1) = -0,91\ln(X_1)+6,092$	-0,91	6,092	$4,7536 \cdot 10^{-7}$	0,881	49,356
$f(X_2) = -0,43\ln(X_2)+2,075$	-0,43	2,075	0,007123	0,569	8,801
$f(X_3) = -0,476\ln(X_3)+1,576$	-0,476	1,576	0,020338	0,494	6,253
Образец 2					
$f(X_1) = -1,09\ln(X_1)+7,215$	-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
Образец 3					
$f(X_1) = -0,83\ln(X_1)+5,633$	-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

Для образца 1: $f(X_i) = 0,9999997 \cdot (-0,91\ln(X_1)+6,092) \cdot (-0,194\ln(X_2)+1,629) \cdot (-0,011\ln(X_3)+0,977)$

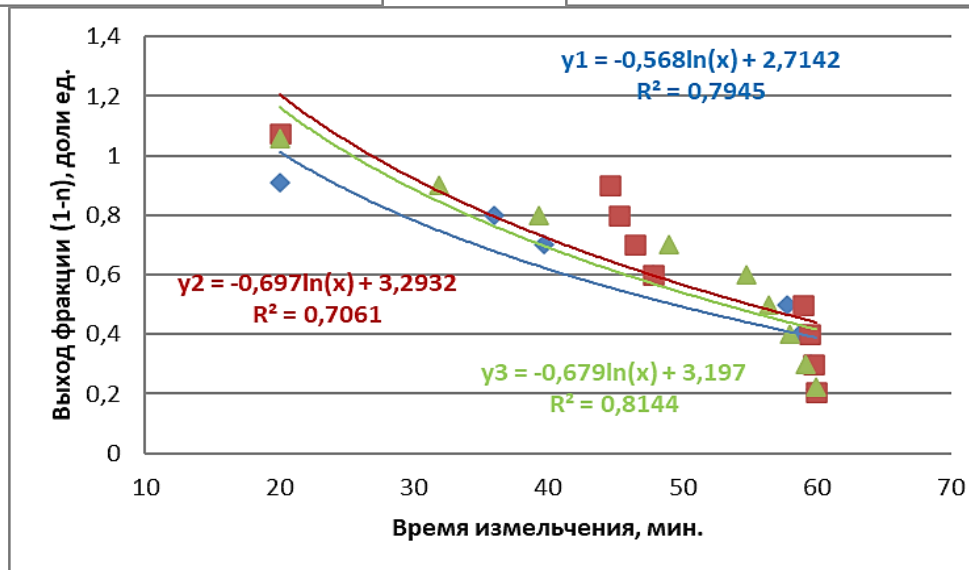
Для образца 2: $f(X_i) = 0,999971 \cdot (-1,09\ln(X_1)+7,215) \cdot (-0,153\ln(X_2)+1,505) \cdot (-0,057\ln(X_3)+1,112)$

Для образца 3: $f(X_i) = 0,999129 \cdot (-0,83\ln(X_1)+5,633) \cdot (-0,21\ln(X_2)+1,665) \cdot (-0,279\ln(X_3)+1,54)$

Оптимизация технологических параметров измельчения (метод обобщенного приведенного градиента (ОПГ))



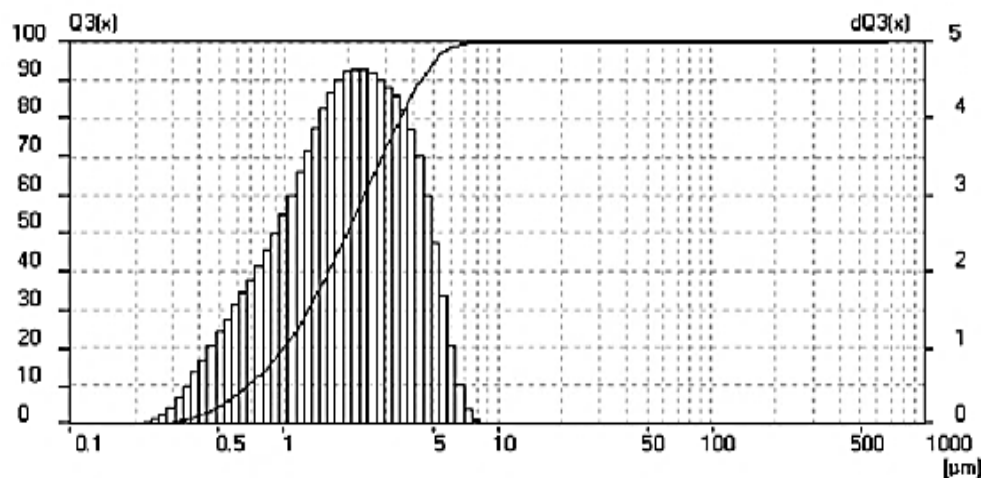
Расчетные
зависимости выхода
фракции (-0,026+0 мм)
от регулируемых
технологических
параметров.



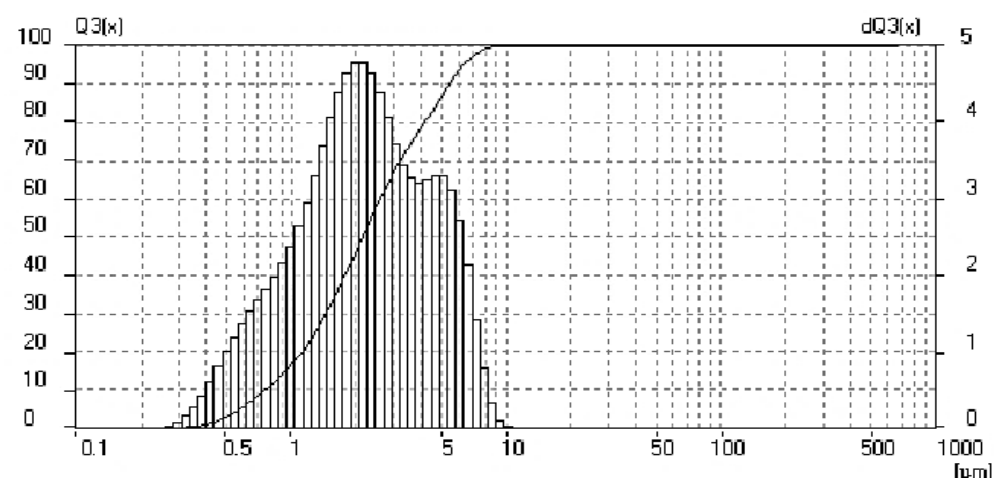
Оптимизация технологических параметров измельчения дисперсных порошков.

Параметр	Ед. изм.	Значение параметра			Выход фракции $-0,026+0$ мм (1-п), доли ед.		
		min	optimum	max	min	optimum	max
X_1	об/мин.	300	600	600	0,227 – 0,221	0	0,908 – 1,000
X_2	мин.	20	60	60			
X_3	доли ед.	4,26	11,92	11,92			

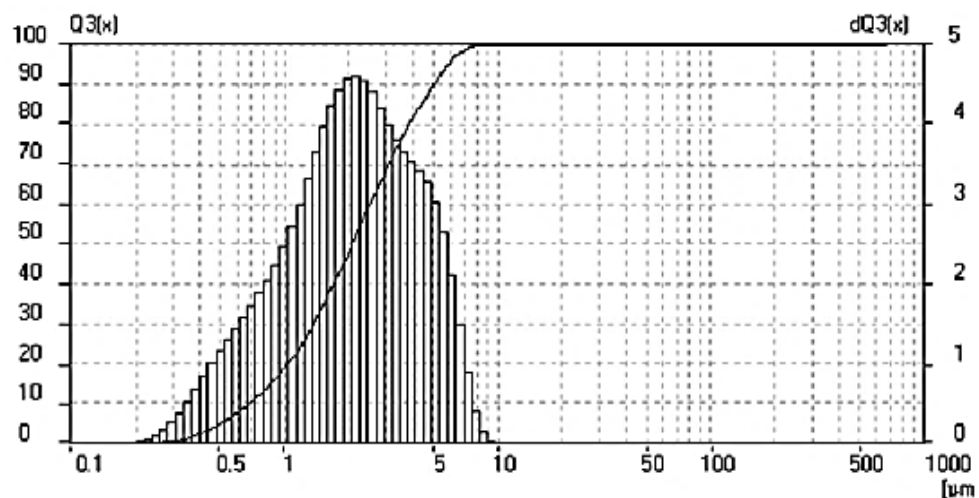
Получение порошков ультрадисперсной фракции



Распределение размеров частиц ДП №1 по фракциям после измельчения в планетарной мельнице



Распределение размеров частиц ДП №2 по фракциям после измельчения в планетарной мельнице



Распределение размеров частиц ДП №3 по фракциям после измельчения в планетарной мельнице

Размер, фракции, мкм	Выход фракции, %		
	ДП образца №1	ДП образца №2	ДП 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

Состав бетона, модифицированного ДП строительных отходов

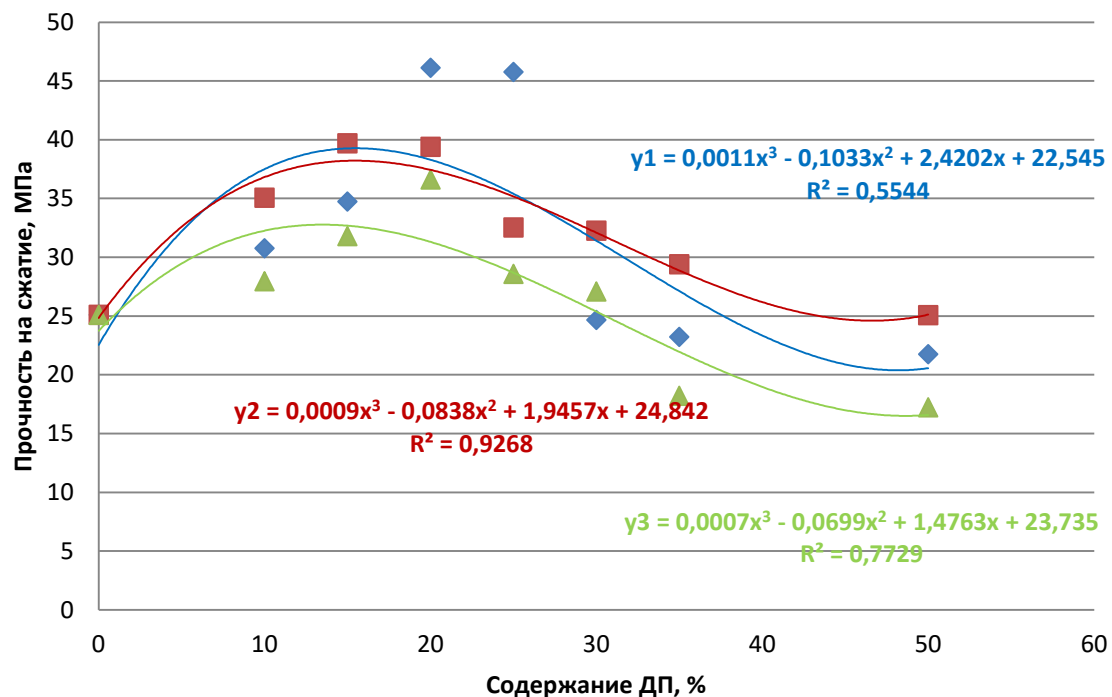
Компоне нты бетонной смеси	Состав бетонной смеси, г							
	Бетон В22,5 – контрольн ый образец	ДП, % от массы цемента						
		10	15	20	25	30	35	50
ДП	0	14,4	21,6	28	36,0	42,8	50,4	72,0
Цемент (ПЦ 500)	144,0	129,6	122,4	115,2	108,0	101,0	93,6	72,0
Песок	236,7	235,6	230,1	224	230,0	218,0	223,6	240,0
Щебень (-20+5) мм	378,0	381,2	367,2	386,6	378,0	391,0	383,0	360,0
Вода	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0	58,0

Механические свойства модифицированных бетонных образцов

Образцы бетона	Содержание ДП	Мах напряжени е, МПа	Мах нагрузка, кН	Модуль упругости, ГПа	Образцы бетона	Содержание ДП	Мах напряжени е, МПа	Мах нагрузка, кН	Модуль упругости, ГПа
№0	0%	25,101	119,332	27,5	№0	0%	25,101	119,332	27,5
№1	10% ДП №1	30,756	144,245	42,71	№8	10% ДП №2	35,073	166,947	42,33
№2	15% ДП №1	34,750	162,352	50,8	№9	15% ДП №2	39,708	186,229	43,175
№3	20% ДП №1	46,112	222,722	51,70	№10	20% ДП №2	39,400	194,439	48,54
№4	25% ДП №1	45,759	217,675	50,8	№11	25% ДП №2	32,531	153,465	45,05
№5	30% ДП №1	24,665	114,765	50,04	№12	30% ДП №2	32,261	151,431	44,14
№6	35% ДП №1	23,215	108,787	47,61	№13	35% ДП №2	29,40	125,242	43,32
№7	50% ДП №1	21,741	94,158	46,41	№14	50% ДП №2	25,078	119,295	39,23

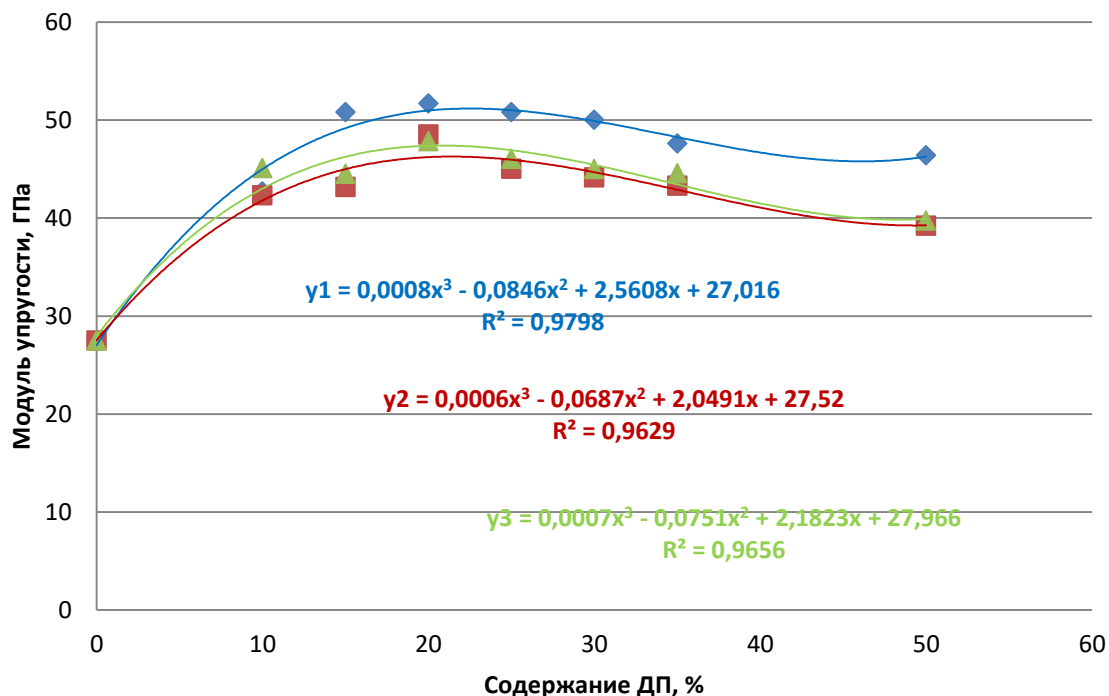
Образцы бетона	Содержание ДП	Мах напряжени е, МПа	Мах нагрузка, кН	Модуль упругости, ГПа
№0	0%	25,101	119,332	27,5
№15	10% ДП №3	27,947	121,040	45,10
№16	15% ДП №3	31,808	142,277	44,50
№17	20% ДП №3	36,615	174,178	47,84
№18	25% ДП №3	28,595	140,087	46,04
№19	30% ДП №3	27,078	130,730	45,02
№20	35% ДП №3	18,202	80,718	44,57
№21	50% ДП №3	17,225	80,124	39,74

Механические свойства модифицированных бетонных образцов



Зависимость прочности образцов бетона на сжатие от содержания ДП в цементе:

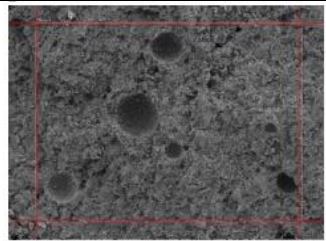
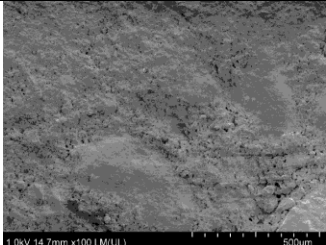
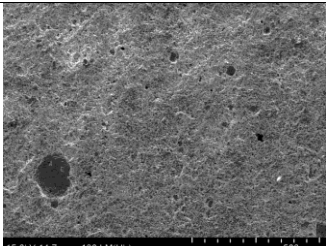
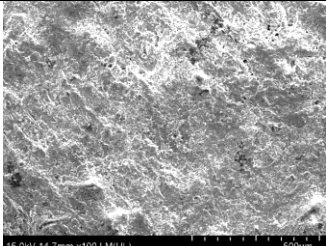
- у1 – образцы с добавлением ДП1;
- у2 – образцы с добавлением ДП2;
- у3 – образцы с добавлением ДП3



Зависимость модуля упругости образцов бетона от содержания ДП в цементе:

- у1 – образцы с добавлением ДП1;
- у2 – образцы с добавлением ДП2;
- у3 – образцы с добавлением ДП3

Анализ морфологии поверхности образцов бетона

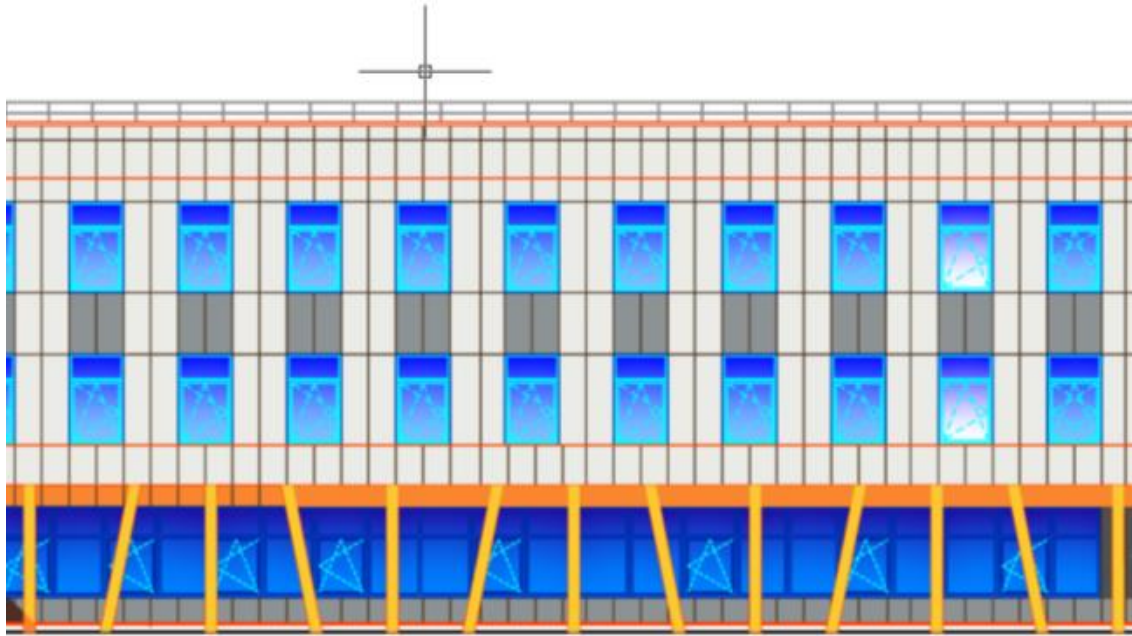
	Контрольный образец бетона
	Образец бетона с заменой 20 % бетона на ДП №1
	Образец бетона с заменой 20 % бетона на ДП №2
	Образец бетона с заменой 20 % бетона на ДП №3

Микроанализ образцов бетона с добавлением ДП №1, ДП №2 и ДП №3 в количестве 20 % от массы цементной смеси показывает, что формирование более однородного состава происходит от третьего к первому образцу. Это хорошо коррелирует с результатами определения прочности на сжатие и модуля упругости бетонных образцов.

Анализ морфологии поверхности образцов №1, №2 и №3 на сканирующем электронном микроскопе SU8010, Hitachi, Япония при увеличении (x100)

Расчет конструкции

Расчет стандартного перекрытия 6мх6м толщина 200мм. Стандартная арматура диаметром 20 мм.



При условии соблюдения нормативной плотности армирования, толщины защитного слоя и корректной схемы опирания, толщина перекрытия 160 мм может быть принята как допустимая как при использовании арматуры диаметром 18 мм, так и 16 мм, без существенного влияния на надёжность и эксплуатационную пригодность конструкции.

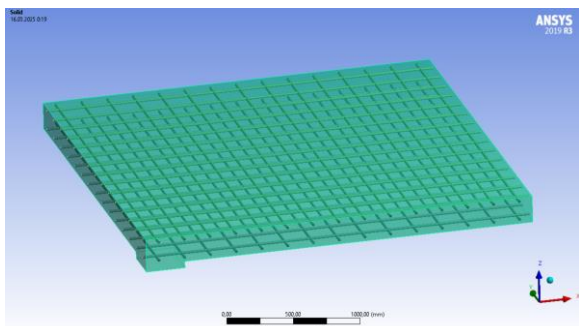
Стоимость материала для получения плиты перекрытия на 20% ниже, чем стандартного материала. Стоимость используемой арматуры на 48% ниже, чем в стандартном проекте.

Масса плиты из предлагаемых бетонов на 23 % легче стандартной плиты. Масса арматуры на 36% легче, чем в стандартном исполнении. Что значительно уменьшает нагрузку на фундамент.

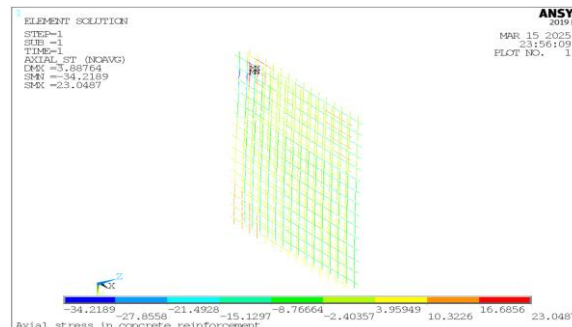
	Материал плиты перекрытия	Арматура
Экономия стоимости материала (%)	20	48
Уменьшение массы (%)	23	36



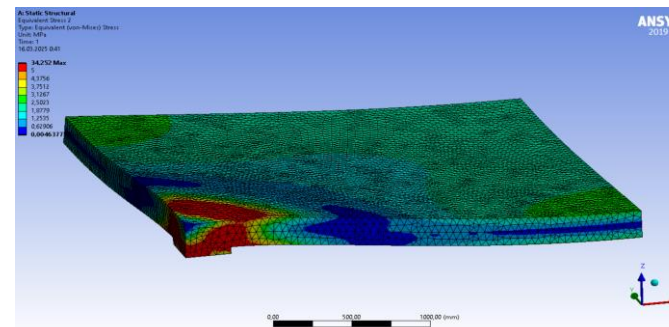
Расчет конструкции (продолжение)



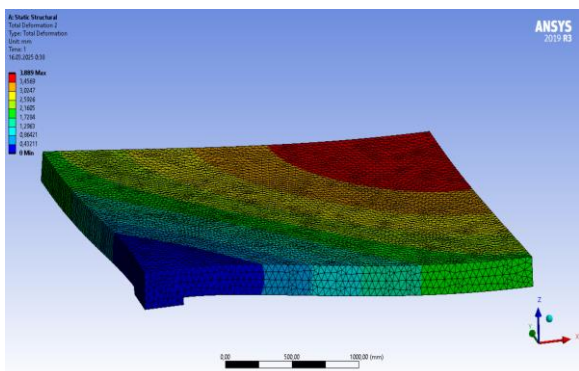
Расчётная модель



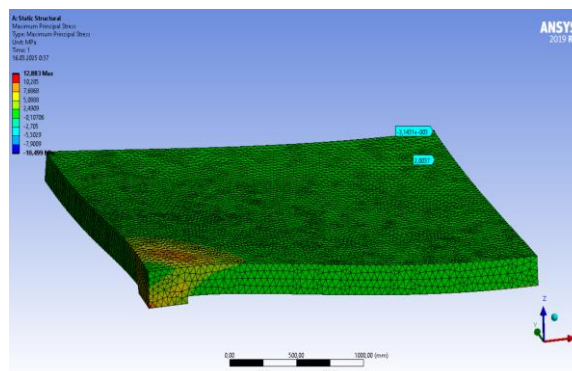
Осевые напряжения в арматуре



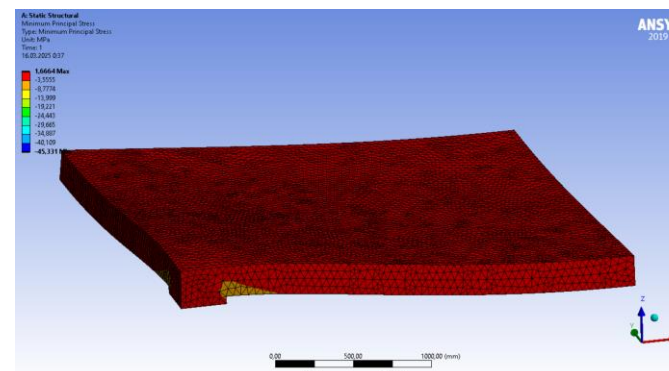
Эквивалентные напряжения в бетоне



Результирующие перемещения



Главные максимальные напряжения



Главные минимальные напряжения



Выводы



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.



Выводы - продолжение



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 – 86,64 % при содержании ДП в количестве 10–30 % от массы цемента, коэффициента упругости – на 42,65 – 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 – 86 %, коэффициент упругости – на 74 – 83 % по сравнению с контрольными значениями.

10. Расчётно-экспериментальным путём доказано, что применение бетона с добавкой ДП строительных отходов приводит к уменьшению массы плиты на 23 % и массы арматуры на 36%. Что значительно уменьшает нагрузку на фундамент. Экономический эффект от замены материалы бетона составит 20%. Экономический эффект от уменьшения диаметра металлоконструкций составит 48%



Спасибо за внимание!