

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования  
«Тольяттинский государственный университет»

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Трещиностойкость элементов зданий и сооружений, произведенных с использованием фибробетона

Обучающийся

К.А. Анохин

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный  
руководитель

канд. техн. наук, доцент, В.Н. Шишканова

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. пед. наук, доцент, О.Н. Брега

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

## Содержание

Введение.....	4
1 Теоретические аспекты производства фибробетона и его применения.....	7
1.1 Проблема производства и использования фибробетона. ....	7
1.2 Виды армирующей фибры и ее характеристики .....	10
1.2.1 Полипропиленовая фибра .....	10
1.2.2 Стальная фибра.....	11
1.2.3 Фибра из стекловолокна .....	13
1.3 Применение фибробетона в монолитном строительстве несущих конструкций.....	13
1.4 Методика изготовления фибробетонной смеси .....	16
1.5 Проверка содержания воздуха в фибробетоне в зависимости от характера его включения.....	16
1.6 Расчет по количественному составу.....	17
1.7 Указания по смешиванию и добавлению фибры. ....	18
1.7.1 Требования к оборудованию .....	19
1.7.2 Требования к документальной части .....	22
1.8 Уплотнение.....	22
1.9 Уход за фибробетоном.....	24
1.10 Трещиностойкость конструкционных материалов. Повышение показателя трещиностойкости .....	25
2 Методика проведения испытаний .....	30
2.1 Характеристика применяемых материалов.....	30
2.2 Методы входного контроля бетонной смеси.....	34
2.3 Разрушающие методы испытания физико-механических свойств фибробетонных образцов.....	36
2.3.1 Испытания образцов по прочности на сжатие .....	36
2.3.2 Испытания образцов по прочности на растяжение .....	38
3 Процесс проведения испытаний.....	41

3.1	Исследование свойств бетона с металлическими армирующими волокнами.....	41
3.2	Исследование свойств фибробетона с полипропиленовыми армирующими волокнами .....	52
3.2.1	Зависимость прочностных показателей фибробетона с полипропиленовыми армирующими волокнами от содержания фибры ..	52
3.2.2	Зависимость прочностных показателей фибробетона на ПП волокне от соотношения количества цемента к песку.....	57
3.3	Исследование свойств фибробетона с армирующими волокнами из отходов производства .....	62
3.3.1	Зависимость прочностных показателей фибробетона с армирующими волокнами из отходов производства от содержания армирующего волокна.....	63
3.4	Сравнительный расчет момента трещинообразования в конструктивном элементе здания.....	68
3.5	Технико – экономическое обоснование использования фибробетона на основе металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства.....	73
3.6	Выводы по главе .....	76
	Заключение .....	78
	Список используемой литературы .....	80

## Введение

Актуальность работы. Современность и темпы развития технологий и экономики диктуют высокие требования к возводимым зданиям и сооружениям, что требует производства максимально эффективных строительных материалов, оцениваемых по целому ряду факторов. Так традиционные бетоны, применяемые в строительстве столетиями, сейчас переживают множество изменений в своем составе как на микро- (молекулярный состав) так и на макро- (дисперсный состав) уровнях.

При росте популяции человечества набирает темп жилое и промышленное строительство, являющиеся основной отраслью народного хозяйства. Так увеличивается не только количество возводимых зданий, но и масштаб вводимых строек. Если ранее стандартом крупных многоквартирных домов было строительство 16-этажных одноподъездных строений серии П-60, то сейчас это индивидуальные многоподъездные 26-этажки, разворачивающиеся на целые кварталы.

Ведущим материалом при возведении многих видов недвижимости является бетон в различных его проявлениях.

В соответствии с ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые», бетон – это «Искусственный камневидный строительный материал, получаемый в результате формования и твердения рационально подобранной и уплотненной бетонной смеси» [11]. Формирование характеристик бетона – его жесткости, восприятия нагрузок и воздействий зависит от применяемого заполнителя. Помимо высоких конструктивных качеств в бетоне ценят возможность создания форм архитектурной выразительности, малую энергоемкость и высокую надежность.

Из новых и наиболее перспективных видов выделяют фибробетон, состав которого включает в себя различное фиброволокно, применяемое для армирования конструкций с высокой прочностью.

«Актуальность темы связана с тем, что применение фибры в бетоне

обеспечивает ему более высокие по прочности на растяжение, прочности на изгиб, на срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость, морозостойкость, водонепроницаемость, жаропрочность и пожаростойкость. При этом, такие признаки способствуют возможности выделить фибробетоны в независимую группу конструкционных материалов, отличающихся особенностями строения и свойствами» [5].

Данная магистерская диссертация посвящена исследованию физико-механических свойств фибробетонов, изготовленных с использованием фибры различного вида в составе несущих элементов зданий и их влияния на трещиностойкость конечного конструктивного элемента.

Цель работы заключается в определении влияния применения фибробетона различных составов на прочностные характеристики (в частности трещиностойкость) элементов зданий при условии эффективного использования материала.

Предметом исследования магистерской диссертации является трещиностойкость несущих элементов здания, выполненных из фибробетона.

Объект исследования магистерской диссертации - несущие элементы зданий.

Для достижения поставленной цели приняты следующие задачи:

- Рассмотреть теоретические аспекты производства фибробетонов и несущих элементов здания из фибробетона.
- Исследовать основные процессы образования структуры фибробетона.
- Рассчитать зависимость показателя момента трещинообразования от добавления армирующей фибры в состав материала несущих конструкций зданий и сооружений в различных концентрациях при сохранении общих габаритов сечения и диаметров стержневой арматуры.
- Проанализировать эффективность использования фибробетона в

качестве материала для изготовления несущих конструкций зданий и сооружений путем проведения технико-экономического сравнения.

Методы исследования – анализ, сравнение, наблюдение, эксперимент, описание.

Научная новизна диссертационной работы, заключается в следующем:

– Исследованы физико-механические свойства в процессе твердения фибробетона на металлической, полипропиленовой фибре и фибре из отходов производства.

– Рассчитана зависимость показателя момента трещинообразования от добавления армирующей фибры в состав материала несущих конструкций зданий и сооружений в различных концентрациях при сохранении общих габаритов сечения и диаметров стержневой арматуры;

– Проанализирована эффективность использования фибробетона в качестве материала для изготовления несущих конструкций зданий и сооружений путем проведения технико-экономического сравнения.

– Подобран оптимальный состав фибробетонов с использованием фибры, что позволяет сократить расход цемента при одновременном улучшении характеристик фибробетонов на металлической, полипропиленовой фибре и фибре из отходов производства.

Практическая значимость. Разработаны составы фибробетонов на основе портландцемента, наполнителя цемента, гиперпластификатора, металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов промышленного производства. Проведен сбор, анализ и систематизация данных о прочностных характеристиках, несущих элементов зданий на различных стадиях твердения. Проведен сравнительный расчет трещиностойкости и экономической целесообразности использования перспективного материала.

# 1 Теоретические аспекты производства фибробетона и его применения

## 1.1 Проблема производства и использования фибробетона.

В современном мире, как и многие годы до этого, бетон остается основным и наиболее распространенным материалом в жилом и промышленном строительстве. Однако, как и во всех аспекты нашей жизни, здесь постоянно происходит совершенствование технологий и областей применения.

В процессе этого развития появились новые вариации строительных материалов. Одним из них в 1874 году стал фибробетон (Рисунок 1), являющийся на данный день одним из наиболее перспективных. В нашей стране первое появление фибробетона произошло в 1979 году, когда в Ленинграде был построен резервуар для технической воды с применением 1,5% фибры на единицу объема бетона.

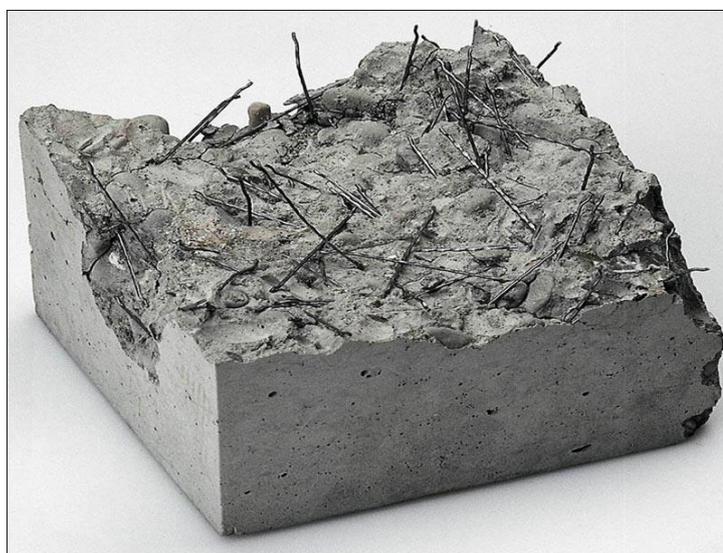


Рисунок 1 – Структура блока из сталефибробетона

«На сегодняшний день показатель мирового объема производства бетона составляет 2 млрд. м<sup>3</sup>, когда показатели выпускаемой

промышленной продукции и строительных материалов иных видов сравнительно ниже» [2].

Основная идея такого материала заключается в объемном дисперсном армировании с равномерным распределением волокон различных материалов, взамен традиционного армирования стержнями.

Наиболее выгодно и оправдано использование фибробетона в качестве фундаментов зданий и сооружений, мостов, туннелей. Также фибробетон часто используется в качестве полов промышленных объектов.

«Для получения качественного фиброцементного состава, требуется модификация состава бетона. Перемешивание бетонной смеси осуществляется в механических смесителях до достижения однородности. Время перемешивания исчисляется с момента поступления смеситель расчетного объема последнего компонента смеси, миксер не должен быть загружен свыше расчетного объема. Химические добавки должны вводиться в процессе перемешивания, за исключением пластификаторов и водопонижающих добавок, которые могут вводиться в конце перемешивания» [13] После их введения смесь вновь перемешивается, для равномерного распределения добавок.

Общие данные по областям применения фибробетона представлены в виде таблицы 1.

Таблица 1 – Применение фибробетонов в строительстве

Монолитные	Сборные
Полы промышленных объектов	Трубопроводы
Полотно автомобильных дорог	Ригели
Сооружения с высокими требованиями по взрывозащите	Лестничные марши
Водоотводные дамбы	Элементы кровли
Оросительные каналы	Элементы трубопровода
Емкости и резервуары	Плиты перекрытия
Пространственные сооружения	Элементы пространственных сооружений

«Дисперсно армированные бетоны дают экономический эффект за счет высоких показателей долговечности, эксплуатационной пригодности, износостойкости, а также повышения межремонтного ресурса и безопасности зданий и сооружений при пожарах и сейсмических воздействиях» [10].

Выделяют следующие достоинства фибробетонов:

- Отсутствие дорогостоящего и трудоемкого в производстве армокаркаса;
- Высокая стойкость к температурным воздействиям;
- Хорошая адгезия фибробетонных конструкций;
- Малая масса по сравнению с традиционным железобетоном;
- Высокий срок службы.

К недостаткам фибробетонов относят:

- Повышенный износ бетоносмесительного оборудования;
- Высокая стоимость.

Однако наиболее значимый недостаток связанный с экономической составляющей использования решается с течением времени путем перехода к безотходному производству, ведь в качестве фибры можно использовать практически что угодно: от металлической стружки до стеклопластиковых опилок.

«Дисперсно-армированные бетоны дают экономический эффект за счет высоких показателей долговечности, эксплуатационной пригодности, износостойкости, а также повышения межремонтного ресурса и безопасности зданий и сооружений при пожарах и сейсмических воздействиях» [10].

«Активное производство и успешное использование фибробетона практикуется более чем в ста странах мира. С каждым годом этот материал применяют в новых сферах строительства. На сегодняшний день в России номенклатура и показатель объема выпускаемой продукции, выполненной из фибробетона невелики, тем не менее, опыт зарубежных стран убеждает

российских специалистов в перспективности использования данного строительного материала» [4].

## **1.2 Виды армирующей фибры и ее характеристики**

### **1.2.1 Полипропиленовая фибра**

Наиболее распространенным материалом в производстве фиброволокна является полипропилен (Рисунок 2) — «синтетический полимер, обладающий водостойкостью (практически не впитывает влагу), теплостойкостью (начинает плавиться только при 175 °С), большой прочностью, высокой стойкостью к химическому воздействию кислот, щелочей и солей» [9].

Такое волокно получают продавливанием нагретой полипропиленовой массы через формовочные отверстия определенного сечения и нарезают на равные отрезки определенной длины.



Рисунок 2 – Внешний вид полипропиленовой фибры

«Физико-механические и химические свойства полипропилена позволяют широко использовать полипропиленовую фибру для армирования тяжёлых и ячеистых бетонов, монтажно-кладочных растворов, торкретбетонов, цементных стяжек, простых и декоративных штукатурок.

Фиброармирование полипропиленовыми волокнами строительных композитных материалов из бетона, цемента, гипса значительно увеличивает износостойкость готовых конструкций и покрытий за счёт повышения ударопрочности и сопротивления к деформациям, морозостойкости, водонепроницаемости, устойчивости к воздействию высоких температур и химически агрессивных веществ» [13].

«Фибра, состоящая из волокон диаметром 20-50 мкм и длиной от 3 до 12 мм подходит как для армирования цементно-песчаной стяжки, так и для штукатурных и шпаклёвочных материалов. Фибра с волокнами длиной 18 мм применяется для армирования бетонных и цементных стяжек, торкретбетонов. Оптимальная длина волокон позволяет фибре хорошо размешиваться в растворе, равномерно распределяясь и армируя его по всему объёму, что препятствует образованию внутренних дефектов стяжки. Полипропиленовая фибра способствует сокращению времени первичного и окончательного затвердевания раствора; в процессе усадки раствор не расслаивается, существенно уменьшается отделение воды и образование микротрещин» [2].

### **1.2.2 Стальная фибра**

По своей сути стальная фибра представляет собой отрезки стальных волокон, получаемых следующими способами:

- резка тонкой проволоки или стального листа;
- вытяжка (экструдирование) стального расплава;
- фрезерование специальных слябов.



Рисунок 3 – Внешний вид металлической фибры

«Стальная фибровая арматура достаточно эффективна с учетом стоимости. Модуль упругости такой фибры в 5 – 6 раз больше модуля упругости бетона. Такое фиброволокно может иметь круглое, прямоугольное и другое поперечное сечение размером от 0,2 – 1,6 мм и длиной от 5 – 160 мм» [10].

«Сталефибробетоны – это сочетание мелкозернистого и тяжелого бетона со стальной фиброй, равномерно распределенной по объему бетона, совместная работа которых обеспечивается за счет сцепления анкеров на концах фибр и их поверхности» [24].

«По сравнению с традиционным железобетоном сталефибробетон рекомендуют для изготовления конструкций, использование которых наиболее эффективно. Технические преимущества сталефибробетона по сравнению с обычным железобетоном:

- повышение трещиностойкости, ударной прочности, вязкости разрушения, износостойкости и морозостойкости;
- понижение усадки и ползучести;

- использование более эффективных конструктивных решений, таких как тонкостенные конструкции, конструкции без стержневой, сетчатой распределительной или поперечной арматуры;
- снижается показатель трудозатрат на арматурные работы, повышается степень механизации производства;
- применение новых технологий формования армированных конструкций, таких как торкретирование» [15].

### **1.2.3 Фибра из стекловолокна**

«Фибра из стекловолокна — это измельченное армирующее стекловолокно в виде узких полосок разной длины. Отличается от других добавок повышенной прочностью и модуляционной гибкостью. Такие свойства позволяют положительно сопротивляться развитию кислотно-щелочной среды в восстановленном сооружении. Добавляется материал в момент замеса раствора. Вещество не имеет свойств растворяться, а содержится в составе как индивидуальные микрочастицы. Микрофибра незаметна в уже возведенной конструкции» [13].

Стеклофибробетон, изготовленный на основе традиционного бетонного раствора, имеет с ним некоторые общие свойства: он не горит, не гниёт, не боится морозов и влаги.

## **1.3 Применение фибробетона в монолитном строительстве несущих конструкций**

При монолитном строительстве крайне важными являются условия, при которых происходит возведение для минимизации рисков ухудшения свойств бетона. «Различные косвенные параметры от технологической оснастки и до параметров окружающей среды влияют на конечные эксплуатационные характеристики конструкции» [7].

«Маневренность, подвижность, простота – основные характеристики монолитного строительства. Меньшие сроки возведения сооружений, отсутствие необходимости внедрения тяжелой техники – преимущества в сравнении с каменными кладками и сборными конструкциями. Особое применение монолитное строительство находит в регионах с неоднородной почвой и сложным рельефом, так как нагрузка на фундамент минимальная за счет легкости конструкции» [3].

Как и в прочих видах строительства здесь находятся как преимущества, так и недостатки. Положительные свойства, такие как монолитность и увеличенная прочность и сейсмостойкость превалируют над недостатками. Помимо прочностных характеристик повышение целостности сооружений благоприятно сказывается на теплоизоляции и звукоизоляции, простоте внутренней отделки зданий.

Дисперсное армирование фиброй позволяет повысить целостность материала, его прочностные свойства.

«Благодаря армирующим волокнам увеличивается стойкость к истиранию» [13].

Однако для получения вышеуказанных преимуществ важно соблюдать оптимальное содержание фибры, ведь ее избыток наоборот приводит к снижению прочности на сжатие – основной характеристики монолитных элементов зданий. Оптимальным считается содержание фибры в количестве 0,1-3% от массы исходного материала.

«Чаще всего модуль упругости армирующего волокна выше чем у бетона матрицы, что позволяет повышать предел прочности, в частности на изгиб» [9].

Фибра из полипропилена и нейлона имеет сравнительно низкий модуль упругости, что не гарантирует качественного повышения прочности бетона, так как волокна работают на поглощение энергии. Наибольшей прочностью обладают фибробетоны с применением дисперсного армирования стальными

либо стеклянными волокнами. Значение имеет также сцепление бетона и армирующего волокна. Чем лучше по объему распределено волокно, тем выше ударная вязкость и прочность на изгиб.

Излишки фибры способны вызвать сегрегацию бетона и армирующего волокна. Распределение волоком фибры в матрице бетона случайным образом, уменьшает риск трещинообразования и усадки.

«Стойкость фибробетона к перепадам температур позволяет возводить здания в различных регионах, не ссылаясь на климатические условия, так как фибробетон является морозо- и влагостойким. На фоне всего фибробетон обладает меньшим весом чем обычный армированный бетон, что снижает вес конструкции и соответственно нагрузку на фундамент» [13].

«Стойкость к атмосферным воздействиям, к температурам и влаге, характеризуют фибробетон для монолитного строительства» [3].

Вид фибры из-за уникальных особенностей зачастую определяет область применения материала. Так фибробетон с применением полипропиленового волокна используют при возведении гидротехнических сооружений, так как у этого материала очень высокая коррозионная стойкость.

«Стекловолокно так же обширно применяется при изготовлении фибробетона. Повышает его технические и эксплуатационные характеристики, позволяет снизить стоимость бетона» [13].

Конструкциям, для которых основное значение играют прочностные характеристики, следует предусматривать дисперсное армирование стальной фиброй, так как у этого материала высокие показатели прочности на изгиб и сжатие, высокая ударостойкость и низкая хрупкость. «Рост прочности на сжатие является небольшим так как, в местах растяжения происходит отрыв элементарных частиц бетона, появляющихся по периферии зоны воздействия сил действующих на образец» [6].

«При растяжении сталефибробетона появляется сопротивление матрицы бетона и волокон фибры, что затрудняет разрыв элементарных

объектов бетона, за счет чего значительно увеличивается прочность на осевое растяжение и изгиб. Из чего вытекает высокая ударостойкость и трещиностойкость» [13].

#### **1.4 Методика изготовления фибробетонной смеси**

«При изготовлении качественного фиброцементного состава часто применяется модификация состава. Перемешивание бетонной смеси осуществляется в механических смесителях до достижения однородности. Время перемешивания состава рассчитывается исходя из требуемого объема конечного продукта и исчисляется с момента поступления в смеситель последнего компонента смеси. Химические добавки при этом вводятся в процессе перемешивания. Исключением являются суперпластификаторы и водопонижающие добавки, добавляемые в конце перемешивания» [28]. После внесения указанных добавок смесь перемешивается повторно для равномерного их распределения. При выборе волокон следует опираться на значение прочности на сжатие и на растяжение.

#### **1.5 Проверка содержания воздуха в фибробетоне в зависимости от характера его включения**

При изготовлении фибробетона выделяют два вида смеси по содержанию воздуха:

– Фибробетон с захваченным воздухом:

«Фибробетон с захваченным воздухом нужно проверять до и после добавления волокон в бетон, для определения количества воздуха в бетоне. Захваченный воздух образует поры в бетоне в результате механического перемешивания смеси» [2].

– Фибробетон с вовлеченным воздухом:

В фибробетоне с вовлеченным воздухом проверяется его содержание до и после добавления волокон. «Микроскопические пузырьки воздуха, искусственно вводимые в бетон в процессе перемешивания, с использованием поверхностно-активных веществ, образуют этот вовлеченный воздух» [2].

## 1.6 Расчет по количественному составу

«Расчет содержания бетона – это характеристика состава затвердевшего бетона, равняющаяся содержанию фиброволокон по объему (в %).» [2]  
Основные характеристики различных видов фиброволокна, цементного камня и бетона сведена в таблицу 2.

Таблица 2 – Сравнение характеристик фиброматериалов, цементного камня и бетона.

Материал	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Модуль упругости E, Н/мм <sup>2</sup>	Прочность на растяжение, Н/мм <sup>2</sup>	Растяжение при разрыве, %	Устойчивость к действию щелочи	Температура плавления, °С
Полипропилен	0,9	3000-15000	300-700	5-15	Отличное	150
Полиакриолит	1,2	15000-20000	600-900	6-9	Отличное	400
Цементный камень	2,2	10000-25000	3-6	0,01-0,05	-	-
Бетон	2,4	30000-40000	1-4	0,02	-	-

«Перерасчет содержания фибры в %-объемном отношении, характерном при механическом воздействии в измерении содержания в кг/м<sup>3</sup>, имеет важное значение при производстве и определении стоимости, определяется уравнением:

$$C_f = V_f \times P_f \times 10, \quad (1)$$

где  $C_f$  - Содержание волокон, кг/м<sup>3</sup>,

$V_f$  - Содержание волокна по объему в %-м соотношении,

$P_f$  - Плотность волокнистого материала, г/см<sup>3</sup>» [11].

### 1.7 Указания по смешиванию и добавлению фибры.

Огромное значение в процессе изготовления бетонной фибры имеют не только данные по содержанию, массе и виду компонентов, но и о концентрации замешивания в единицу времени (например, 40 кг/мин), о продолжительности замешивания после добавления фибры.

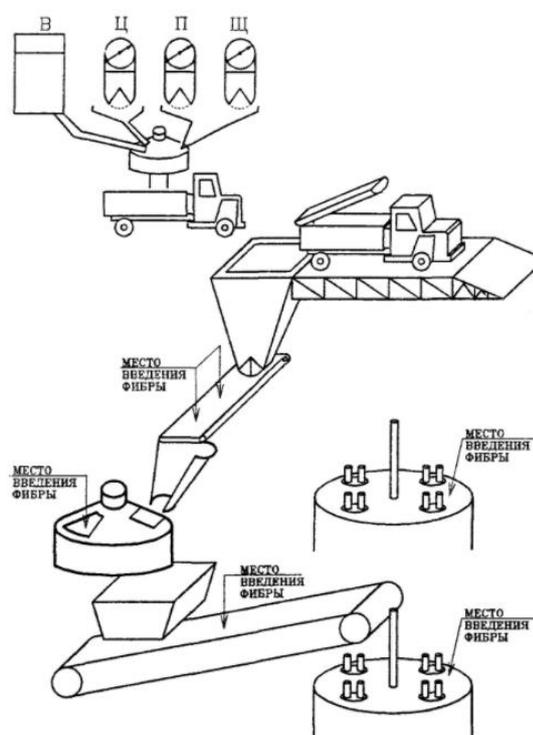


Рисунок 4 – Принципиальная схема изготовления фибробетонных элементов

«Добавление фибры может происходить непосредственно в бетоносмесителе или автобетоносмесителе. При смешивании фибр, нужно тщательно следить за равномерностью распределения волокон в бетонной смеси» [2].

### 1.7.1 Требования к оборудованию

Внедрение фибры в фибробетон происходит на стадии непосредственного изготовления раствора, что позволяет избежать комков, качественно перемешав цементный состав с армирующим его фиброволокном. Количество добавки строго нормируется в зависимости от ее типа, требований к прочности бетона и обычно составляет 0,3-1,5 кг (при качественных компонентах), но! может достигать и 25 кг/м<sup>3</sup>.

Для транспортировки фиброволокна в бетоносмеситель используют вспомогательные подъемно-транспортные средства. Используют следующие способы подачи:

- ленточные конвейеры
- ковшовые конвейеры
- самоходные бункера
- спускные лотки/ трубы



Рисунок 5 – Ручная подача фиброволокна в смеситель на базе автомобиля КАМАЗ-5310

«При небольших объемах бетонной смеси допускается ручное введение фибры при строгом соблюдении правил техники безопасности» [1].

Устройства, применяемые для дозировки фибр:

«При поточном непрерывном производстве фибробетона применяют полуавтоматические и автоматические дозаторы для растворов, применяющихся для заливки больших форм. Полностью автоматические дозаторы используются при производстве на заводах. Наибольшее распространение получили:

- спиральные конвейеры на основе вибрации
- вибротроки с обратным весовым дозированием
- ленточные дозаторы» [4].



Рисунок 6 – Механизированная подача мелкодисперсного фиброволокна с помощью ленточного транспортера

Для поддержания контроля качества производимой продукции, на всех этапах процесса ведется документирование характеристик фибробетонной смеси с последующим включением в накладную.

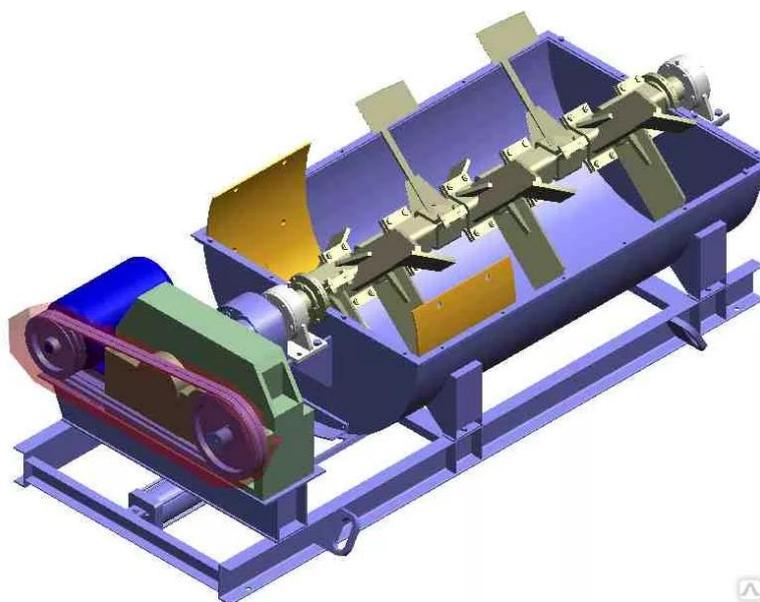


Рисунок 7 – Принципиальная схема смесителя принудительного действия

При процессе перемешивания следуют указаниям методики, описанной в ГОСТ Р 57345-2016/EN 206-1/2013, кроме следующих исключений и дополнений:

- Приготовление смеси рекомендуется осуществлять в смесителях принудительного действия;
- «При смешивании фибробетонной смеси в смесителях принудительного действия следует придерживаться времени в одну минуту на оборот смешивания, а у остальных смесителей время смешивания составляет как минимум две минуты за оборот, после добавления всех ингредиентов» [5]. При иных сроках требуется дополнительное подтверждение равномерности распределения фиброволокна;
- При приготовлении фибробетонных смесей требуется добавлять фибру настолько это возможно непрерывно. «При максимальном вращении требуется выдерживать не менее одной минуты на м<sup>3</sup> свежего бетона и по крайней мере пять минут после добавления фибры» [5];
- Контроль за качеством транспортируемого и приготовленного на площадке фибробетона.

### **1.7.2 Требования к документальной части**

При передаче фибробетонной смеси заказчику производитель сопровождает конечный продукт сертификатом качества и документацией по контролю фибробетона. «Этот документ о качестве доказывает надлежащее производство, мониторинг, гарантию качества для заказчика (заказчика строительства, представителя заказчика-застройщика, или документ о качестве армирования инженеру испытательной лаборатории)» [11].

Эти гарантии указаны в накладной завода-изготовителя и должны содержать дополнительно к указаниям ГОСТ Р 57345-2016/EN 206-1/2013 точный тип фибробетона.

«Параллельно к накладному производителю бетона дается приложение для производства фибробетонной смеси на стройплощадке. Производитель фибробетона должен обеспечить контроль дальнейшей поставки бетонной смеси, которая должна соответствовать первой поставке» [2].

«Диаметр трубы для производства бетона, подаваемого бетононасосом, должен составлять минимум 1,5-кратности длины фибры. Особое внимание обращается на оптимальную закладку фибры в бетонную матрицу, чтобы обеспечить достаточное перемешивание фибры с бетоном» [2].

## **1.8 Уплотнение**

«Для разравнивания и уплотнения уложенной фибробетонной смеси следует использовать стандартные виброрейки, виброкатки, поверхностные, площадочные вибраторы. Для ручной раскладки для смесей с ОК до 8 см рекомендуется применять садовые вилы» [6].

«При вибрировании фибробетона не рекомендуется предварительно разравнивать смесь граблями. При данном действии в верхнем слое материала фиброволокна ориентируются в одном направлении, что способствует появлению усадочных трещин» [12].



Рисунок 8 – Уплотнение фибробетона

«Время вибрирования устанавливают при отработке технологии производства работ, путем пробных формовок образцов-призм с последующим их испытанием на растяжение при изгибе, с учетом параметров подвижности фибробетонной смеси отдельно для горизонтальных и вертикальных конструкций» [6].

«Уплотнение горизонтальных поверхностей виброрейкой производят до появления цементного молочка на поверхности. Для объемных конструкций при уплотнении глубинными вибраторами время уплотнения ограничивают моментом прекращения выделения пузырьков воздуха на поверхности» [1].

При уплотнении фибробетонной смеси глубинным вибратором (вибробулавой, виброиглой) диаметром, обеспечивающим его проход между

арматурой, необходимо погрузить его в ранее уложенный слой на глубину от 3 до 5 см. Шаг перестановки глубинного вибратора не должен превышать 1,5 радиуса его действия. При использовании вибратора поверхностного типа, шаг его перестановки должен обеспечивать повторное вибрирование 100 мм уплотнённого ранее участка.

## **1.9 Уход за фибробетоном**

«Открытые поверхности свежеложенного бетона немедленно после окончания бетонирования (в том числе и при перерывах в укладке) следует надежно предохранять от испарения воды. Свежеложенный бетон должен быть также защищен от попадания атмосферных осадков. Защита открытых поверхностей бетона должна быть обеспечена в течение срока, обеспечивающего приобретение бетоном прочности не менее 70%, в последующем поддерживать температурно-влажностный режим с созданием условий, обеспечивающих нарастание его прочности» [5].



Рисунок 9 – Пример использования фибробетона

Для обеспечения качества уложенной фибробетонной смеси и роста прочности при твердении, оптимальной является среда с относительной влажностью от 90% до 100% и температурой от 18 °С до 25 °С.

«Создание благоприятных условий для твердения фибробетонной смеси осуществляется путем полива фибробетона распыленной струей воды, а также нанесением пленкообразующего материала. Особенно данные мероприятия целесообразно применять для защиты уложенной фибробетонной смеси от потерь влаги в окружающую среду на больших площадях» [6].

Пленкообразующие материалы рекомендуется наносить на свежеложенную смесь при отсутствии влаги на поверхности.

В технологическом процессе прогрева бетона в монолитных конструкциях должны быть приняты меры по снижению температурных перепадов и взаимных перемещений между опалубочной формой и бетоном.

«В массивных монолитных конструкциях следует предусматривать мероприятия по уменьшению влияния температурно-влажностных полей напряжений, связанных с экзотермией при твердении бетона, на работу конструкций» [3].

## **1.10 Трещиностойкость конструкционных материалов. Повышение показателя трещиностойкости**

Трещиностойкость – способность материала сохранять целостность и оказывать сопротивление образованию трещин, возникающих в результате различных по характеру и величине нагрузок.

На конструкциях изготовленных с использованием бетонов трещины могут появляться в следующих случаях:

– В случае резких перепадов температур или влажности в процессе твердения конструкций;

– В случае возникновения растягивающих напряжений в элементах, твердеющих в «зажатых» условиях;

– В случае возникновения растягивающих напряжений, больших по значению, чем максимально установленные расчетом для данной конструкции при ее нормальной работе.

В зависимости от характера работы и области применения того или иного элемента здания, образование в нем трещин может быть критически важным. По данному показателю СП 63.13330.2018 устанавливает «Предельно допустимую ширину раскрытия трещин  $a_{cr,ult}$  следует устанавливать исходя из эстетических соображений, наличия требований к проницаемости конструкций, а также в зависимости от длительности действия нагрузки, вида арматурной стали и ее склонности к развитию коррозии в трещине».

СНиП 2.03.01-84\* вводит понятие «категория требований к трещиностойкости» и устанавливает следующую градацию:

- Первая – образование трещин недопустимо;
- Вторая – допускается возникновение трещин шириной до 0,2 мм с обязательным их закрытием;
- Третья – допускается образование трещин с непродолжительным и продолжительным открытием до 0,3 мм.



Рисунок 10 – Пример поражения оголенных участков арматуры элемента, расположенного в агрессивных условиях (повышенная влажность).

Так, например, появление прямого доступа агрессивных веществ к армирующим стержням в растянутой зоне ведет к ускоренной их коррозии и потере общей несущей способности. По аналогичной причине образование трещин недопустимо и для гидротехнических сооружений (Рисунок 10).

«С целью повышения характеристик трещиностойкости конструкций, в состав их материалов вводят различные химические и структурные добавки укрепляющего характера, проводят омагничивание воды, железнение поверхности, покрывают элемент дополнительными защитными составами» [24].

С учетом указанного выше, логичным видится внесение изменений в состав бетона на этапе проектирования конструкции. Так в особо

ответственных конструкциях все чаще приходят к использованию дисперсного армирования волокнистыми или проволочными добавками малой длины. Механика работы таких добавок состоит в том, что произвольно ориентированные в камне армирующие добавки, при достаточно равномерном их распределении воспринимают часть приложенной нагрузки на себя и в виду высокой прочности на растяжение действуют схоже с располагаемой в растянутой зоне сечения элемента классической стержневой арматурой.

Для анализа эффективности мероприятий по предотвращению образования трещин или по уменьшению их величины раскрытия необходимо проведение соответствующих расчетов элементов. В ходе практики для рассмотрения методики такого расчета принят способ повышения трещиностойкости с помощью внесения в состав фибры различного характера (металлическая, полипропиленовая, стекловолоконная).

### **1.11 Выводы по главе**

В соответствии с изученным можно утверждать, что фибробетон в рассмотренных условиях применения является перспективным конструкционным материалом. Развитие и совершенствование дисперсно-армированных бетонов обусловлено расширением номенклатуры композитного волокна различных видов и свойств.

Высокой экономической выгоды удастся достичь благодаря улучшенным свойствам конечных конструкций при меньших затратах и более совершенных технологиях производства и возведения конструкций.

«Таким образом, подтверждение целесообразности использования дисперсно–армированных конструкций исходит из правильного понимания работы конструкций под нагрузками, оценки модернизированных свойств после внедрения фиброволокна различного вида и исходит из опыта производства и эксплуатационных параметров конструкций» [9].

Анализ данных представленной в нормативной литературе и данных, полученных в результате проведения собственных предварительных экспериментов, позволяет сформулировать следующие выводы по результатам исследования:

– Обычные бетоны имеют невысокие показатели прочности на растяжение, трещиностойкости, что является значительным ограничением для использования в качестве конструкционных материалов для несущих конструкций зданий и сооружений;

– «Дисперсное армирование фиброволокнами различного вида и размеров способствует улучшению характеристик прочности и деформации» [10];

– Единственный недостаток фибробетона связан с его высокой стоимостью в сравнении с классическим железобетоном.

## 2 Методика проведения испытаний

### 2.1 Характеристика применяемых материалов

Для проведения исследований экспериментальной части магистерской диссертации использовалась лаборатория «Центра архитектурных, конструктивных решений и организации строительства». В работе применялись методы исследования строительных материалов (фибробетона), соответствующие государственным стандартам проведения испытаний.

Для создания экспериментальных образцов выбраны следующие материалы:

1) Портландцемент: «Holcim» тип ЦЕМ II с классом прочности 42,5Б (M500-Д0). Данный цемент является быстротвердеющим цементом общестроительного назначения ПЦ–500 Д0 и обладает повышенной прочностью конечной конструкции, составляющую 500 кг/см<sup>2</sup>. Holcim Extracem M500 используется для жилищного и промышленного строительства. «Материал предназначен для производства конструкций, подвергающихся высокой нагрузке. Цемент применяют в составе кладочного раствора при возведении стен из кирпича или блоков. Данный состав идеально подходит для заливки фундаментов, бетонирования железных конструкций. Раствором можно выравнивать полы, стены, маскировать имеющиеся дефекты» [7].

Эксплуатационные характеристики «Holcim Extracem» приведены в таблице 3.

Таблица 3 - Характеристика портландцемента

Наименование характеристики	Ед. изм	Полученное значение
1	2	3
Прочность (возраст 2 суток)	МПа	
- изгиб		4,55±0,2
- сжатие		22,0±2,0

Продолжение таблицы 3

1	2	3
Прочность (возраст 28 суток)	МПа	
- изгиб		8,7±0,3
- сжатие		51,0±2,0
Удельная поверхность	м <sup>2</sup> /кг	350 ±20
Массовая доля вспомогательного компонента (опока)	%	4,0±1,0
Нормальная густота цементного теста	%	27,0±1,0
Сроки схватывания	Час:мин	
- начало		2:40±0:20
- конец		3:50±0:20

2) Мелкий заполнитель.

а) Волжский речной песок по ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ».

Характеристики речного Волжского песка приведены в таблице 2.2.

Таблица 4 – Характеристика Волжского песка

Наименование характеристики	Ед. изм	Полученное значение
Модуль крупности	мм	1,33
Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	0,7

Содержание пылевидных и глинистых частиц в песке Волжского месторождения – 0,7% по массе (норматив по ГОСТ 8736-2014 до 6%). Глина в комках отсутствует.

Гранулометрический состав речного Волжского песка представлен в таблице 5.

Таблица 5 – Гранулометрический состав Волжского песка

Наименование показателя	Ед. изм	Полученное значение
1	2	3
Насыпная плотность	Кг/м <sup>3</sup>	1470
Размер сита, мм	%	Остатки (%) на ситах (частные/ полные)
5		—

Продолжение таблицы 5

1	2	3
2,5	%	0,4
		<u>0,4</u>
1,25		0,4
		<u>0,8</u>
0,63		1,2
		<u>2,0</u>
0,315		30,0
	<u>32,0</u>	
0,16		66,0
		<u>98,0</u>
<0,16		2,0
		<u>100,0</u>

«Согласно таблице 1 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» речной песок Волжского месторождения по значению модуля крупности относится к группе песка очень мелкий» [25].

б) Камский песок по ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ». Характеристики Камского песка приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Характеристика мелкого Камского песка

Наименование характеристики	Ед. изм	Полученное значение
Модуль крупности	мм	3,53
Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	0,7

Гранулометрический состав речного Волжского песка представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Гранулометрический состав Камского песка

Наименование показателя	Ед. изм	Полученное значение
1	2	3
Размер сита, мм	%	Остатки (%) на ситах (частные/ полные)
5		—
2,5		33,93
		<u>33,93</u>

Продолжение таблицы 7

1	2	3
1,25	%	20,85
		<u>54,78</u>
0,63		18,35
		<u>73,13</u>
0,315		18,49
		<u>91,62</u>
0,16		7,51
		<u>99,13</u>
<0,16		0,87
		<u>100,0</u>

Согласно таблице 1 ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия» речной песок Волжского месторождения по значению модуля крупности относится к группе песка «Повышенной крупности».

3) Крупный заполнитель: щебень из гранодиоритов.

Щебень из плотных горных пород – гранодиоритов с фракцией 5 – 10 мм по ГОСТ 8267-93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия». Технические характеристики щебня из гранодиоритов представлены в таблице 8.

Таблица 8 - Характеристика крупного заполнителя

Наименование технической характеристики	Значение технической характеристики
Марка по дробимости	M1400
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы	I группа (до 10%)
Марка по истираемости	И1
Насыпная плотность	1470 кг/м <sup>3</sup>
Морозостойкость	F300
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов	Менее 370 Бк/кг, 1 класс для любых видов строительства

#### 4) Фиброволокно.

Для дисперсного армирования бетонов применялись следующие виды фиброволокна:

а) Металлическая фибра волнового профиля ФСВ-В-0,3/15 Белорусского металлургического завода.

Характеристики фибры волнового профиля приведены в таблице 9.

Таблица 9 - Характеристика фибры волнового профиля

Наименование характеристики	Значение	Отклонение
Диаметр, мм	0,3	± 0,05
Длина, мм	15	± 5
Ширина шага гофры, шт	4 -5	-

б) Волокно полипропиленовое микроармирующее длиной  $L = 12$  мм, ООО «Фибраснаб» города Екатеринбург.

«Диаметр нитей волокна составляет 20-25 мкм, прочность на разрыв превышает 450 МПа, модуль упругости не менее 5100 МПа и температура плавления 160 °С» [13].

в) Отходы производства ООО «АКО» - Измельченное стекловолокно.

5) Гиперпластификатор «STACHEMENT 2280» на основе поликарбоксилатов. «Является высокоэффективным жидким, готовым к применению, гиперпластификатором. Данный гиперпластификатор изготовлен на основе поликарбоксилатов. Относится к разряду «быстрых» гиперпластификаторов, так как обладает ускоряющим эффектом и способствует быстрому набору прочности бетона» [19].

## 2.2 Методы входного контроля бетонной смеси

Для начального контроля бетонных образцов предусмотрены входные испытания смеси для дальнейшего использования в расчетах. Таким образом приводятся характеристики смеси:

– Осадка конуса. Данный метод позволяет получить данные о подвижности материала. Эти показатели влияют на удобоукладываемость (способность качественно заполнять предоставленную рабочую форму без воздушных пустот, комков и прочих дефектов) бетона. При исследовании, проводимом в соответствии с данным методом, металлический конус заполняют испытываемым материалом. При снятии конуса осадку получившегося «изделия» измеряют линейкой (Рисунок 11) относительно начальной высоты. Полученные значения сравниваются с табличными и делаются соответствующие выводы.

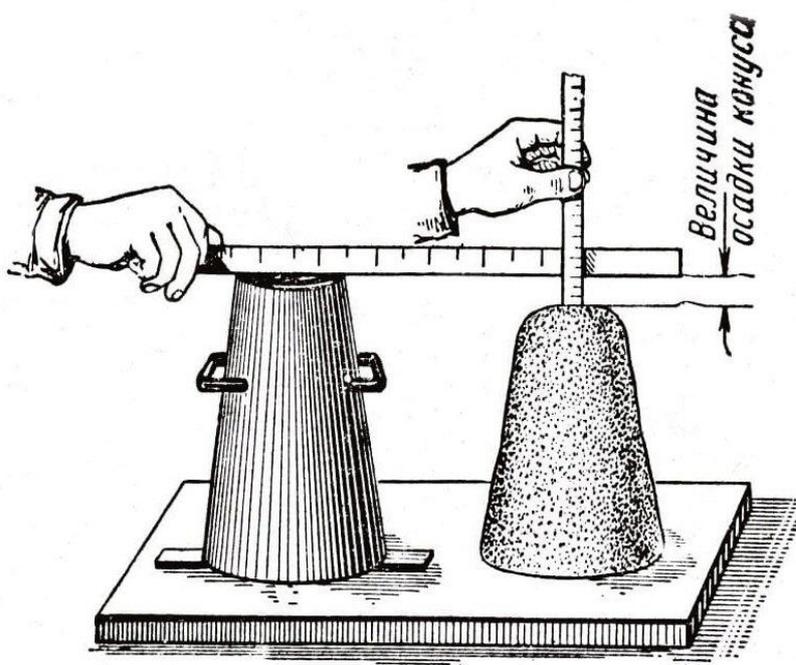


Рисунок 11 – Определение величины осадки конуса

– Проверка наличия воздушных пустот в бетонном растворе. При исследовании данного параметра фибробетона проводят два взвешивания образца: до и после уплотнения. Для определения малейших отклонений массы образца обязательно применение точных поверенных весов.

## **2.3 Разрушающие методы испытания физико-механических свойств фибробетонных образцов**

### **2.3.1 Испытания образцов по прочности на сжатие**

«Определение прочностных характеристик бетона по контрольным образцам в лабораторных условиях регламентируется ГОСТ10180-2012. Для испытаний на сжатие изготавливают образцы в форме куба размером 10х10х10 см» [25]. Для получения стандартного показателя прочности фибробетона на сжатие применяют переходные коэффициенты.



Рисунок 12 – Исследуемый состав бетона в форме для создания образцов

Исследуемые образцы при сроках твердения в 7, 14 и 28 суток предварительно визуально обследуют на предмет повреждений и деформаций. «Опорные грани образца выбирают так, чтобы направление нагружения было параллельно слоям заливки бетонной смеси» [12].



Рисунок 13 – Прессы МОД П-125 и ИП6010-100-1

Проверенный образец извлекается из формы и помещается на центр плиты гидравлического прессы. Производят плавное постепенное наращивание усилия вплоть до разрушения образца. После каждого испытания фиксируют значения максимальных усилий на сжатие, выполняют статистическую обработку.

«Прочность тяжелого бетона определяют, как среднюю арифметическую величину:

- из двух образцов – по обоим образцам;
- из трех образцов – по двум самым прочным;
- из четырех – по трем самым прочным;
- из шести – по четырем самым прочным» [15].



Рисунок 14 – Образец бетона в процессе испытаний по прочности на сжатие

После каждого испытания фиксируют значения максимальных усилий на сжатие, выполняют занесение данных в журнал испытаний и производят статистическую обработку.

### **2.3.2 Испытания образцов по прочности на растяжение**

«Возможность бетона выдерживать нагрузки и не трескаться определяется значением растяжения. Данный показатель важен для железобетонной конструкции с целью исключения образования коррозии и увеличения эксплуатационного периода. Именно для этого и проводится испытание бетона на растяжение» [18].

Чтобы определить прочность на осевом растяжении, используются образцы в виде призмы размером 15x15x55 см с располагающимся в нижней части сечения пропилом шириной 5 мм и высотой 2,5 см.

Для испытательных мероприятий используется гидравлический пресс и дополнительные приборы, которые указаны в ГОСТ.

При заполнении форм производится штыкование смеси с помощью металлического стержня для наилучшего ее уплотнения. Бетонные образцы должны находиться в форме в течении 24 часов для первичного схватывания.

«После затвердения все элементы маркируются и укладываются в лабораторный шкаф, где они должны пролежать 28 дней в абсолютно нормальных условиях. Это значит, что температура воздуха не должна превышать 20 °С, а влажность 90%.» [17].

По истечении двадцати восьми дней бетонные образцы извлекаются формы и готовят их к определению прочности на растяжение. Для таких целей используется гидравлический пресс. «На часть, расположенную внизу, устанавливается оборудование с двумя специальными опорами в форме полуваляков с расстоянием между ними в 30 см. Сверху также должна присутствовать опора, установленные в центре элемента. На нижних опорах монтируется экспериментальный образец» [19].



Рисунок 15 – Образец бетона в процессе испытаний по прочности на растяжение

«Затем на бетон подается нагрузка, которая распределяется равномерно, в центре давление обеспечивается за счет верхних валиков. На этапе разламывания образца пресс должен остановиться, фиксируется значение

нагрузки в своем предельном максимуме» [19]. Далее рассчитывается показатель прочности конструкции. «В качестве окончательного результата используется средний показатель 3-х вариантов формы. Все данные вносятся в специальный журнал и протоколируются в нем. Все данные вносятся в специальный журнал и протоколируются в нем» [7].

## **2.4 Выводы по главе**

Итогом исследования литературных, электронных и нормативных источников определено следующее:

- Приведены характеристики отдельных компонентов фибробетона с подробным анализом физических свойств, состава и эффекта, достигаемого при включении данного компонента в общую смесь;

- Определены методы дальнейших испытаний фибробетона, проводимых с целью получения прочностных характеристик материала для проведения расчета элемента конструкции здания.

Результаты приведены во второй главе научно-исследовательской работы.

### **3 Процесс проведения испытаний**

Испытания по определению показателя прочности проводились по методике, описанной в ГОСТ 10180-2012 в лаборатории «ЦАКРиОС» на 7, 14 и 28 сутки твердения при нормальных условиях.

При проведении испытаний основными инструментами влияния на показатели исследуемого материала являлись тип фибры и ее объемное содержание. Также для достижения оптимальных показателей по прочности на сжатие подбиралось соотношение массового содержания вяжущего к песку.

#### **3.1 Исследование свойств бетона с металлическими армирующими волокнами**

##### **3.1.1 Зависимость прочностных показателей материала от содержания армирующего волокна**

«В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый самоуплотняющийся бетон» [7]. Все образцы I серии имели одинаковый состав матрицы: Ц/П = 1/1,39 при В/Ц = 0,5.

Для изготовления фибробетонных образцов партий 2 - 8, были использованы портландцемент «Holcim Extracem» ЦЕМ 42,5 Б, природный песок Волжского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.} = 1,3$ , песок Камского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.} = 3,53$ .

Армирующее волокно вводится в состав в соответствии с рекомендациями производителя стальной фибры в количестве от 30 до 170 кг/м<sup>3</sup>. Состав фибробетонной смеси с данной фиброй представлен в таблице 10.

Таблица 10 – Составы исследуемых образцов, изготовленных с использованием металлического фиброволокна

Компонент	Ц/П = 1/1,39						
	№ партии						
	2	3	4	5	6	7	8
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	735	737	738	723	749	718	716
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	511	512	513	502	520	498	498
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	511	512	513	502	520	498	498
Вода, кг/м <sup>3</sup>	367	369	369	361	375	359	358
Пластифицирующая добавка «СТАСЕМЕНТ 2280», кг/м <sup>3</sup>	6	6	6	6	6	6	6
Металлическая фибра	34	51	69	84	104	133	166

Приготовление бетонной смеси осуществлялось в ручном режиме путем перемешивания в чаше сухих компонентов с последующим добавлением воды и пластифицирующей добавки. Процесс смешивания компонентов осложнен склонностью армирующей добавки к комкованию. Для равномерного распределения фибры в объеме бетона, укладываемого в формы образцов, данные образующиеся комки разбивались и освободившиеся волокна распределялись по поверхности состава.



Рисунок 16 – Перемешивание компонентов фибробетонной смеси

Полученная смесь укладывается в формы образцов для испытаний и выдерживаются при нормальных условиях твердения в течении 28 суток. Испытания по прочности на сжатие производятся через 7, 14 и 28 дней после приготовления.

«Испытания образцов на прочность выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т» [9].

Результат испытаний по прочности на сжатие представлен в таблице 11 и на рисунке 18.

Таблица 11 – Результаты испытаний по прочности на сжатие образцов фибробетона с металлической фиброй

Возраст образцов	Прочность на сжатие, МПа							
	№ партии							
	1	2	3	4	5	6	7	8
7 суток	29,5	27,2	26,0	29,1	26,7	30,3	29,2	29,7
14 суток	31,2	35,0	34,2	35,3	34,0	35,5	35,8	36,5
28 суток	38,7	42,5	39,9	39,2	37,6	38,8	38,5	36,5
Металлическая фибра	0	34	51	69	84	104	133	166



Рисунок 17 – Замес фибробетона партии 28

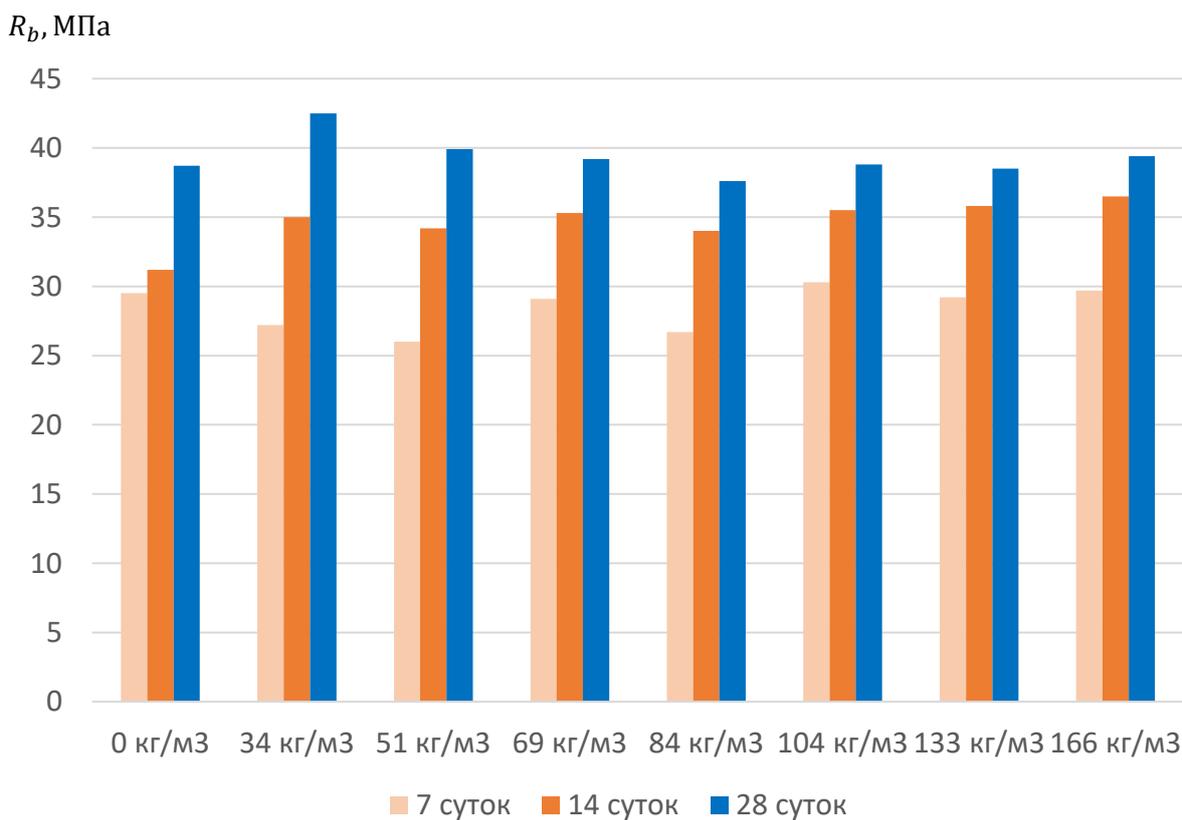


Рисунок 18 – Зависимость прочности фибробетона при сжатии от степени армирования металлической фиброй

Результат: Наилучшие показатели по прочности на сжатие в возрасте 28 суток имеют образцы с армированием фиброй в количестве 34 кг/м³. При дальнейшем увеличении процента армирования, прочность бетона снижается. При этом прочность в возрасте 7 и 14 суток ощутимо выше у образцов с более высоким содержанием фибры, что говорит об ускоренном наборе прочности данных составов. Характер разрушения сталефибробетонных образцов при испытании по прочности на сжатие показан на рисунке 19.



Рисунок 19 – Характер разрушения сталефибробетонного образца (слева) и образца с полипропиленовой фиброй (справа) при испытании по прочности при сжатии

Образцы партий 2-8 имеют пластичный характер разрушения без разрывов волокон, что говорит о ее надежном сцеплении с матрицей композита. «За счет этого повышается срок эксплуатации и безопасность использования изделий из него» [17].

В аналогичных условиях изготовлена партия №1 образцов без использования в составе армирующих волокон. Ее состав принят аналогично составу матрицы образцов партий №2-8: Цемент «Holcim» –  $757 \text{ кг/м}^3$ , Песок «Волжский» –  $526 \text{ кг/м}^3$ , песок Камского месторождения –  $526 \text{ кг/м}^3$ , Вода –  $379 \text{ кг/м}^3$ , Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280» –  $6 \text{ кг/м}^3$ . Прочность при сжатии данного материала составил  $29,5 \text{ МПа}$  в возрасте 7 суток,  $31,2 \text{ МПа}$  в возрасте 14 суток,  $38,7 \text{ МПа}$  в возрасте 28 суток.

Испытания образцов на прочность при растяжении производились в соответствии с методикой СП 360.1325800.2017 «Конструкции сталефибробетонные» на образцах изготовлены в форме призмы (балки) со стандартными размерами: ширина –  $150 \text{ мм}$ , высота –  $150 \text{ мм}$  и длина –  $550 \text{ мм}$

с пропилом шириной не более 5 мм и глубиной 25 мм в центре растянутой грани.

«Испытания образцов на прочность при растяжении выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

В виду больших затрат материала испытания проводились только после твердения образцов при нормальных условиях в течении 28 суток. Результаты представлены в виде таблицы 12.

Таблица 12 - Пределы прочности при растяжении фибробетонных образцов с металлической фиброй

Возраст образцов	Прочность на растяжение, МПа						
	№ партии						
	2	3	4	5	6	7	8
28 суток	4,35	4,2	3,98	3,84	4,31	4,24	4,17
Металлическая фибра, кг/м <sup>3</sup>	34	51	69	84	104	133	166

В аналогичных условиях изготовлена и испытана партия №1 образцов без использования в составе армирующих волокон. Прочность при растяжении данного материала составила 2,27 МПа в возрасте 28 суток.

Испытания образцов на прочность при изгибе производились в соответствии с методикой ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». на образцах изготовлены в форме призмы (балки) со стандартными размерами: ширина – 40 мм, высота – 40 мм и длина – 160 мм.

«Испытания образцов на прочность при изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

Результаты испытаний фибробетонных образцов на изгиб с металлической фиброй представлены в таблице 13.

Таблица 13 - Пределы прочности при изгибе фибробетонных образцов с металлической фиброй

Возраст образцов	Прочность на изгиб, МПа							
	№ партии							
	1	2	3	4	5	6	7	8
28 суток	5,2	6,5	6,0	6,2	5,6	6,3	5,8	5,9
Металлическая фибра, кг/м <sup>3</sup>	0	34	51	69	84	104	133	166

Характер разрушения сталефибробетонных образцов при испытании по прочности на изгиб показан на рисунке 20.



Рисунок 20 – Характер разрушения сталефибробетонного образца при испытании по прочности при изгибе

Наилучшие прочностные характеристики предела прочности при изгибе имеют образцы фибробетона с армированием металлической фиброй в количестве 34 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом мы можем судить о малом повышении прочности образцов на сжатие, но кратном увеличении прочности при растяжении по сравнению с «классическим» бетоном. Оптимальным количеством армирующего волокна в данном случае принимается 34 кг/м<sup>3</sup>.

### 3.1.2 Зависимость прочностных показателей сталефибробетона от соотношения количества цемента к песку

В работе также был проведен анализ зависимости влияния соотношения вяжущего и заполнителя на характеристики материала.

При изготовлении фибробетонов с металлическим армирующим волокном партий № 9 – 17 в качестве вяжущего использовался цемент «Holcim Extraset 42,5», в качестве заполнителя – песок «Волжский» с модулем крупности  $M_{кр.}=1,3$ , песок «Камский» с модулем крупности  $M_{кр.}=3,57$ .

Соотношения количества цемента к количеству песка принимались равными Ц/П = 1/0,67 при В : Ц = 0,43, Ц/П = 1/1,43 при В : Ц = 0,49, Ц/П = 1/2 при В : Ц = 0,49. Составы соответствующих партий приведены в таблицу 14.

Таблица 14 – Составы фибробетонной смеси с металлическими волокнами

Компонент	№ партии								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Ц/П = 1/0,67			Ц/П = 1/1,43			Ц/П = 1/2		
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	727	705	698	723	749	718	501	499	504
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	244	237	234	244	237	234	244	237	234
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	244	237	234	244	237	234	244	237	234
Вода, кг/м <sup>3</sup>	451	473	433	396	394	396	346	344	348
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	10	10	10	6	6	6	7	7	7
Металлическая фибра, кг/м <sup>3</sup>	87	113	146	79	101	136	80	110	146

Распływ конуса исследуемых составов фибробетона составил от 62 до 80 см и пропорционально увеличивался с увеличением количества цемента и уменьшением количества фиброволокна. Бетонные смеси не расслаивались, отличались повышенной связностью.

Результаты испытания образцов фибробетонов на металлическом армирующем волокне приведены в таблице 15 и на рисунке 21.

Таблица 15 – Пределы прочности при сжатии образцов с металлической фиброй в зависимости от соотношения цемента и песка

Возраст	№ партии								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Ц/П = 1/0,67			Ц/П = 1/1,43			Ц/П = 1/2		
7 суток	42,7	41,6	43,3	33,8	28,5	32,3	34,7	34,3	33,3
14 суток	46,7	46,0	46,8	40,6	38,5	37,0	42,0	41,8	41,1
28 суток	49,9	55,5	61	48,9	51,3	52,7	46,8	47,4	50,1
Металлическая фибра	87	113	146	79	101	136	80	110	146

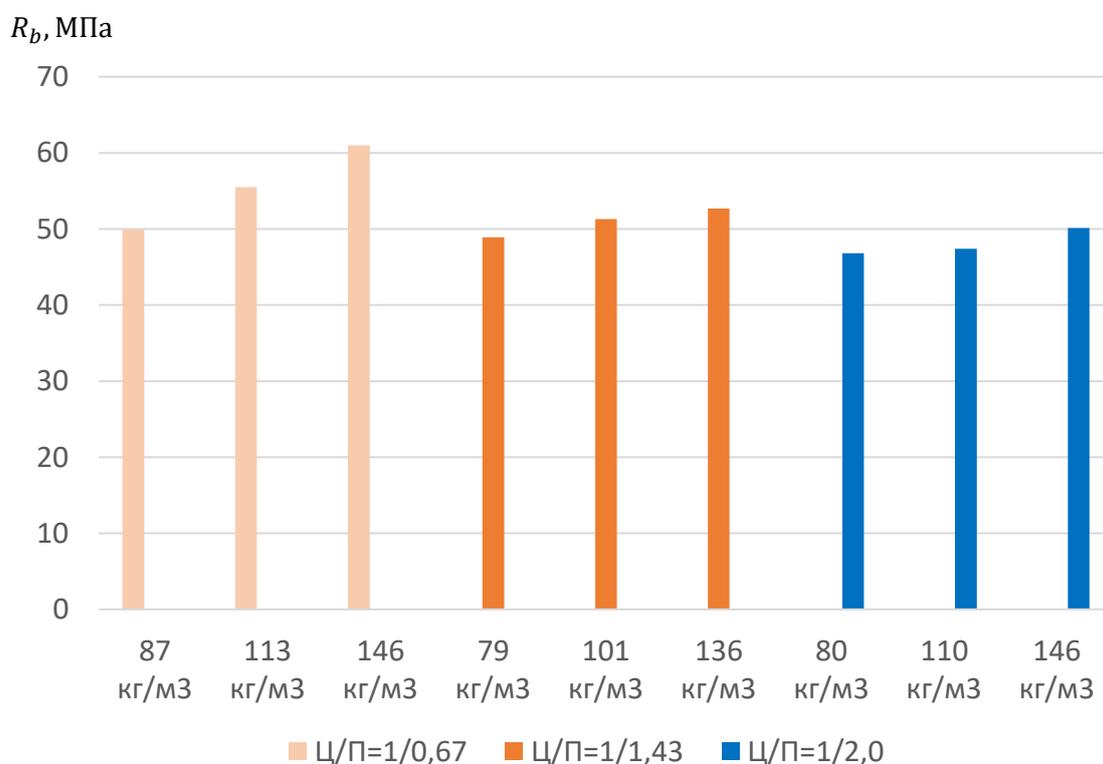


Рисунок 21 – Зависимость прочности фибробетона при сжатии от степени армирования металлической фиброй и соотношения количества вяжущего к песку в возрасте 28 суток

По результатам данных испытаний, наилучшие результаты имеют составы с соотношением Ц/П = 1/0,67. С увеличением армирования прочность фибробетона возрастает. «Исследования показали, что в семисуточном возрасте прочностные характеристики выше у фибробетонов с наименьшим армированием металлическим фиброволокном» [15].

«Испытания образцов на прочность при растяжении выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

В виду больших затрат материала испытания проводились только после твердения образцов при нормальных условиях в течении 28 суток. Результаты представлены в виде таблицы 16 и на рисунке 22.

Таблица 16 – Пределы прочности при растяжении фибробетонных образцов с металлической фиброй в зависимости от соотношения цемента и песка

Возраст	№ партии								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Ц/П = 1/0,67			Ц/П = 1/1,43			Ц/П = 1/2		
28 суток	5,11	5,69	6,25	5,01	5,26	5,40	4,80	4,86	5,13
Металлическая фибра, кг/м <sup>3</sup>	87	113	146	79	101	136	80	110	146

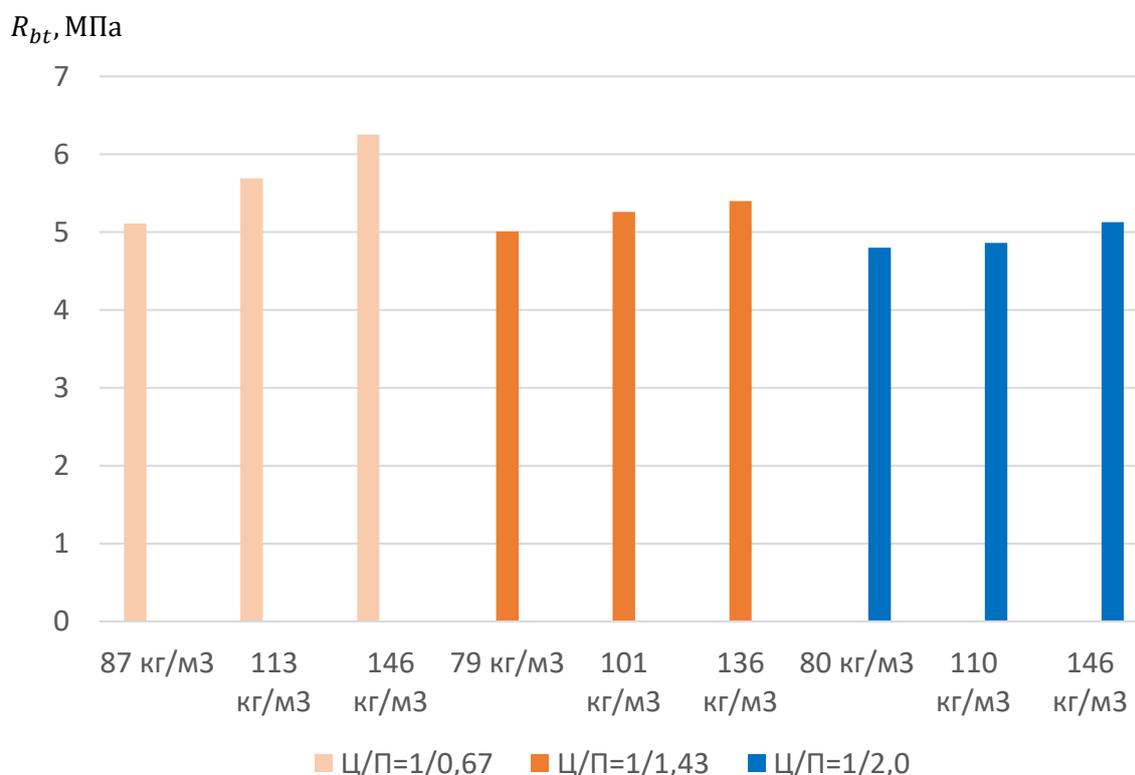


Рисунок 22 – Зависимость прочности фибробетона при растяжении от степени армирования металлической фиброй и соотношения количества вяжущего к песку

«Испытания образцов на прочность при изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т» [9].

Результаты испытания образцов фибробетонов на металлическом армирующем волокне по прочности при изгибе приведены в таблице 17 и на рисунке 23.

Таблица 17 – Пределы прочности при изгибе фибробетонных образцов с металлической фиброй в зависимости от соотношения цемента и песка

Возраст	№ партии								
	9	10	11	12	13	14	15	16	17
	Ц/П = 1/0,67			Ц/П = 1/1,43			Ц/П = 1/2		
28 суток	7,7	8,3	9,1	7,0	6,8	6,7	7,3	7,7	7,9
Металлическая фибра, кг/м <sup>3</sup>	87	113	146	79	101	136	80	110	146

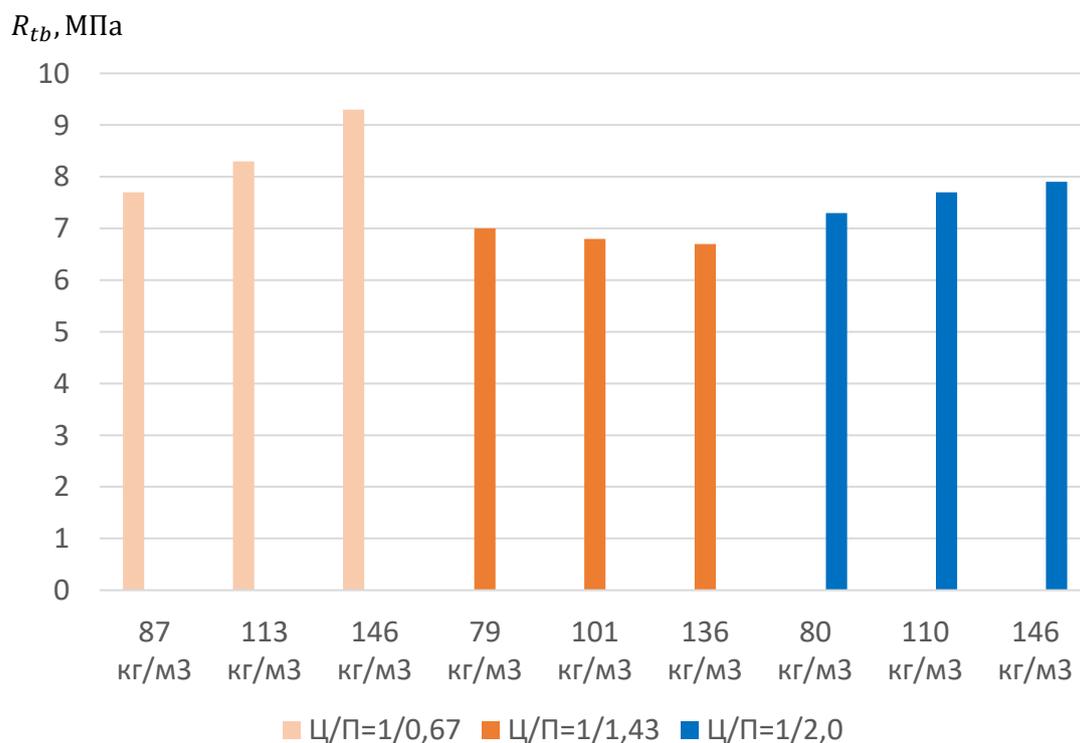


Рисунок 23 – Зависимость прочности фибробетона при изгибе от степени армирования металлической фиброй и соотношения количества вяжущего к песку

Наилучшие результаты по пределу прочности при изгибе имеют фибробетоны с высоким содержанием цемента ( $C/P = 1/0,67$ ). С увеличением количества армирующего волокна предел прочности при изгибе фибробетонов повышается. При сокращении расхода цемента ( $C/P = 1/2$ ) значения прочности при изгибе ухудшаются незначительно, по сравнению с жирными фибробетонами ( $C/P = 1/0,67$ ), всего на 5%, 7% и 15% при минимальном, среднем и максимальном армировании.

### 3.2 Исследование свойств фибробетона с полипропиленовыми армирующими волокнами

3.2.1 Зависимость прочностных показателей фибробетона с полипропиленовыми армирующими волокнами от содержания фибры

Для изготовления фибробетонных образцов партий 18 – 21 были использованы портландцемент «Holcim Extracem» ЦЕМ 42,5Б, природный песок Волжского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=1,3$ , песок Камского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=3,53$ . Распływ фибробетонной смеси определяли путем измерения величины расплыва на встряхивающем столе. Составы бетонных смесей с полипропиленовой фиброй для исследуемых образцов приведены в таблице 18.

Таблица 18 – Составы исследуемых образцов, изготовленных с использованием полипропиленового фиброволокна

Компонент	C/P = 1/1,39			
	№ партии			
	18	19	20	21
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	744	729	728	737
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	517	507	506	512
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	517	507	506	512
Вода, кг/м <sup>3</sup>	372	365	364	369
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	6	6	6	6
Полипропиленовая фибра, кг/м <sup>3</sup>	8	10	11	14

В отличие от смесей с применением металлической фибры, здесь отсутствует комкование армирующего волокна, распределение его по объему смеси более равномерное. За счет высокого водопоглощения фибры, конечная смесь получается менее подвижной. Однако в виду природы полипропиленовой фибры, на поверхности готового изделия наблюдается выступление отдельных волокон, что говорит о необходимости последующей обработки. «При дозировке полипропиленовой фибры в количестве 14 кг/м<sup>3</sup> прочность образцов фибробетона снижается на 20% по сравнению с прочностью образцов с содержанием фибры в количестве 8 кг/м<sup>3</sup>. При содержании фиброволокна 14 кг/м<sup>3</sup> наблюдалось комкование фибры и неравномерное распределение фиброволокон в объеме бетонной смеси, вследствие чего ухудшалась формуемость образцов» [16].

«Испытания образцов на прочность при сжатии, растяжении и изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающей максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

Результаты описанных испытаний по пределу прочности при сжатии представлены в виде таблицы 19 и рисунке 25.

Таблица 19 – Пределы прочности при сжатии образцов с полипропиленовой фиброй

Возраст	№ партии			
	18	19	20	21
	Ц/П = 1/1,39			
	Предел прочности при сжатии, МПа			
7 суток	29,2	27,2	21,3	23,4
14 суток	35,7	36,5	33,8	31,5
28 суток	42,0	39,0	38,5	33,0
Полипропиленовая фибра, кг/м <sup>3</sup>	8	10	11	14

Наилучшие показатели по прочности на сжатие в возрасте 28 дней показали образцы с содержанием армирующего волокна в количестве 8 кг/м<sup>3</sup>. При этом характер разрушения резко отличается от кубиков из бетона-

матрицы. Структура образца после испытаний связанная, без осколков. Разрушение выражается появлением трещин (Рисунок 24).



Рисунок 24 – Характер разрушения образца, армированного полипропиленовой фиброй при испытании по прочности при сжатии

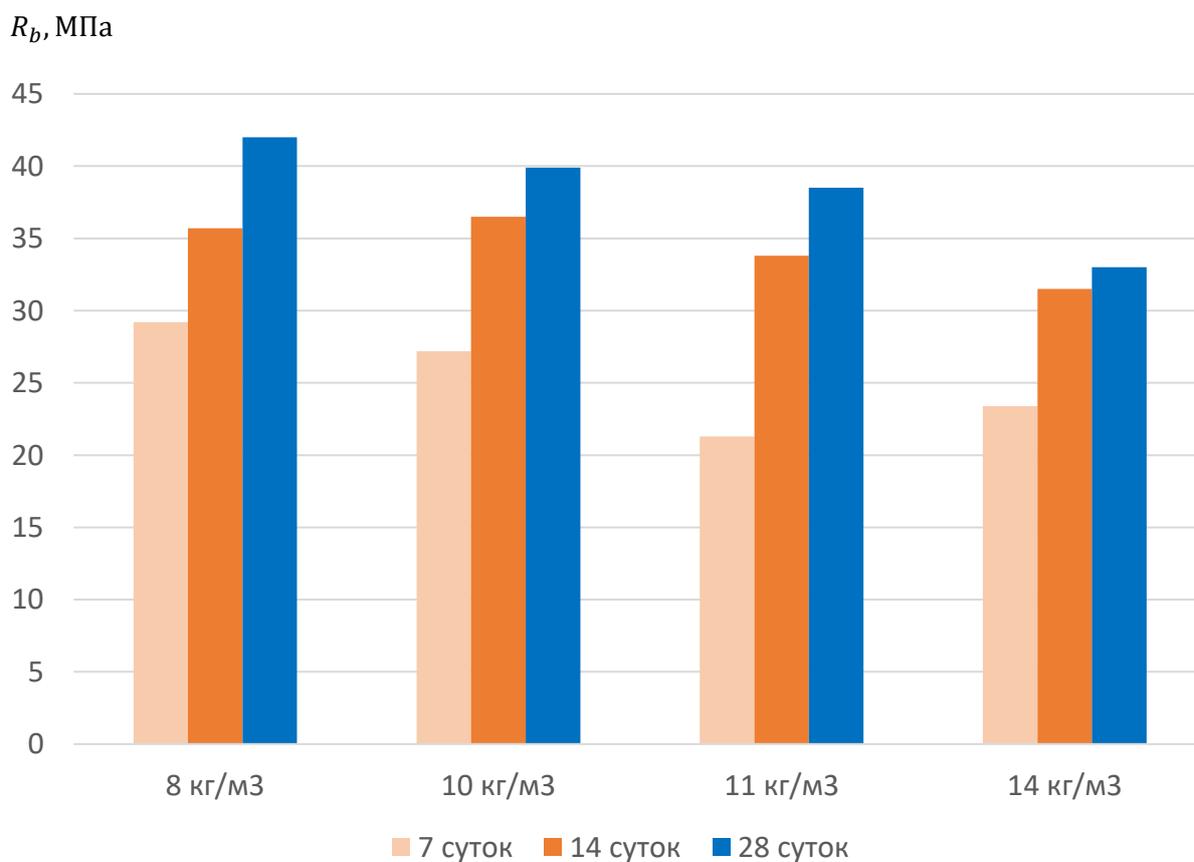


Рисунок 25 – Зависимость прочности фибробетона при сжатии от степени армирования полипропиленовой фиброй

«Испытания образцов на прочность при изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

Результаты испытания образцов фибробетонов на полипропиленовом армирующем волокне по прочности при изгибе приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Пределы прочности при изгибе образцов с полипропиленовой фиброй

Возраст	№ партии			
	18	19	20	21
	Ц/П = 1/1,39			
	Предел прочности при изгибе, МПа			
28 суток	5,5	5,9	6,2	5,0
Полипропиленовая фибра, кг/м <sup>3</sup>	8	10	11	14

«Наибольшую прочность при сжатии показали образцы фибробетонов с количеством фибры 8 кг/м<sup>3</sup>, при изгибе – 11 кг/м<sup>3</sup>. При сравнении результатов исследований предела прочности при изгибе видно, что при изгибе прочность образцов с количеством фибры 11 кг/м<sup>3</sup> возросла на 12,7% по сравнению с пределом прочности образцов, содержащих 8 кг/м<sup>3</sup> полипропиленового фиброволокна» [16].

Таким образом, оптимальным количеством полипропиленового фиброволокна является его содержание в пределах от 8 кг/м<sup>3</sup> до 11 кг/м<sup>3</sup>.

Характер разрушения образцов из фибробетона на полипропиленовом волокне при испытании по прочности на изгиб показан на рисунке 3.12.



Рисунок 26 – Характер разрушения образца, армированного полипропиленовой фиброй при испытании по прочности при изгибе

«Испытания образцов на прочность при растяжении выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

Результаты испытания образцов фибробетонов на полипропиленовом армирующем волокне по прочности при изгибе приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Пределы прочности при растяжении образцов с полипропиленовой фиброй

Возраст	№ партии			
	18	19	20	21
	Ц/П = 1/1,39			
	Предел прочности при растяжении, МПа			
28 суток	5,6	5,8	5,8	5,4
Полипропиленовая фибра, кг/м <sup>3</sup>	8	10	11	14

Наилучшие прочностные характеристики предела прочности при растяжении имеют образцы фибробетона с армированием полипропиленовой фиброй в количестве 10-11 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом мы можем судить о схожих с армированным металлической фиброй фибробетоном прочностных характеристиках. При этом процесс производства конечных изделий упрощается за счет меньшего веса волокна и отсутствии комкования, что уменьшает неоднородность материала.

### 3.2.2 Зависимость прочностных показателей фибробетона на ПП волокне от соотношения количества цемента к песку

В работе также был проведен анализ зависимости влияния соотношения вяжущего и заполнителя на характеристики материала.

При изготовлении фибробетонов с полипропиленовым армирующим волокном партий № 22 – 25 в качестве вяжущего использовался цемент «Holcim Extracem 42,5», в качестве заполнителя – песок «Волжский» с модулем крупности  $M_{кр.}=1,3$ , песок Камского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=3,53$ .

Соотношения количества цемента к количеству песка принимались равными Ц/П = 1/1,43 при В:Ц = 0,45, Ц/П = 1/2 при В:Ц = 0,5. Составы соответствующих партий приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Составы фибробетонной смеси с полипропиленовыми волокнами

Компонент	№ партии			
	22	23	24	25
	Ц/П = 1/1,43		Ц/П = 1/2,0	
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	578	560	490	475
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	417	400	490	475
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	417	400	490	475
Вода, кг/м <sup>3</sup>	376	392	341	348
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	7	7	6	6
Полипропиленовая фибра, кг/м <sup>3</sup>	0	3	5,5	9

Распływ конуса исследуемых составов фибробетона составил от 59 до 63 см и увеличивался с увеличением количества цемента и уменьшением количества фиброволокна.

Результаты испытания образцов фибробетонов на полипропиленовом армирующем волокне приведены в таблице 23 и на рисунках 27-29.

Таблица 23 – Пределы прочности при сжатии, растяжении и изгибе образцов с полипропиленовой фиброй в зависимости от соотношения цемента и песка

Возраст	№ партии			
	22	23	24	25
	Ц/П = 1/1,43		Ц/П = 1/2,0	
	Предел прочности при сжатии, МПа			
28 суток	40,0	47,7	48,4	44,9
	Предел прочности при растяжении, МПа			
28 суток	4,2	5,4	5,9	5,7
	Предел прочности при изгибе, МПа			
28 суток	5,4	6,0	6,4	6,2
Полипропиленовая фибра, кг/м <sup>3</sup>	0	3	5,5	9

По результатам данных испытаний, наилучшие результаты имеют составы с соотношением Ц/П = 1/2. С увеличением армирования до 5,5 кг/м<sup>3</sup> прочность фибробетона возрастает, после ее значение уменьшается.

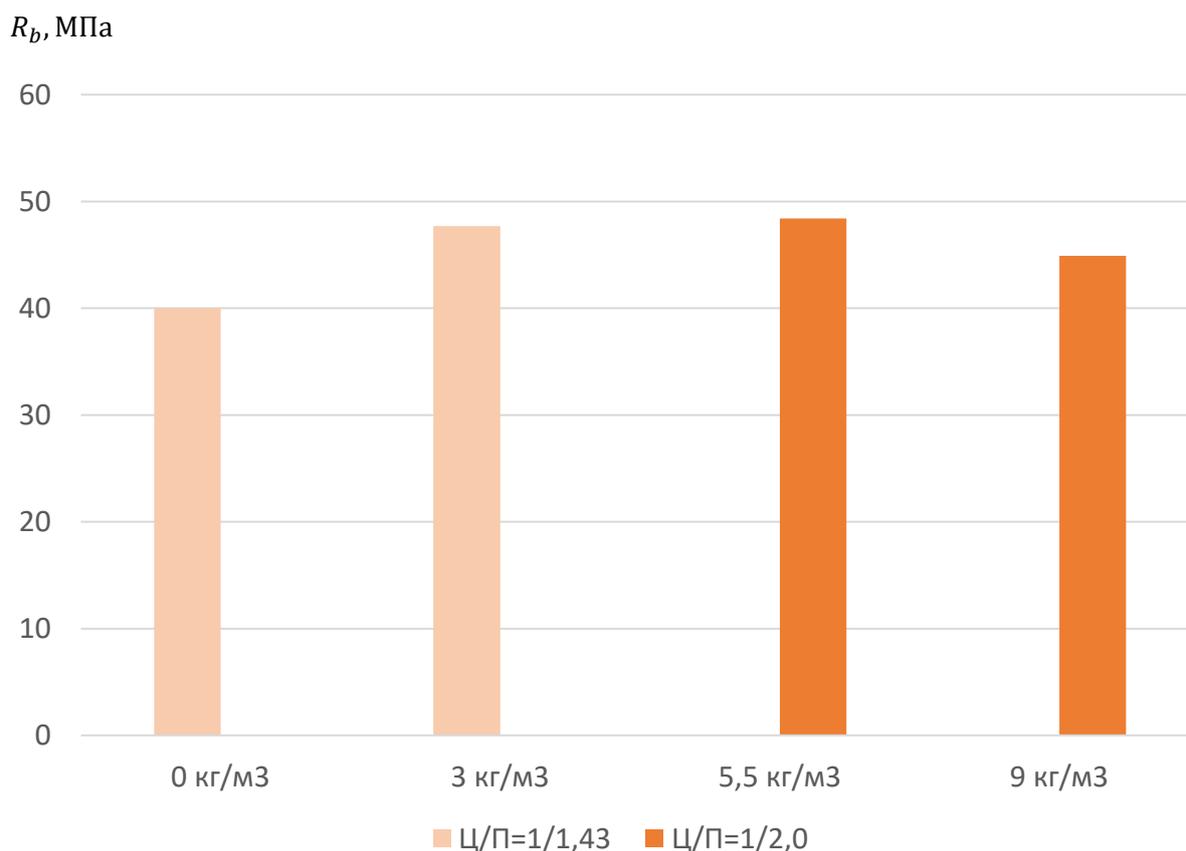


Рисунок 27 – Зависимость прочности фибробетона при сжатии от степени армирования полипропиленовой фиброй и соотношения количества вяжущего к песку

«Испытания образцов на прочность при растяжении выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

В виду больших затрат материала испытания проводились только после твердения образцов при нормальных условиях в течении 28 суток.

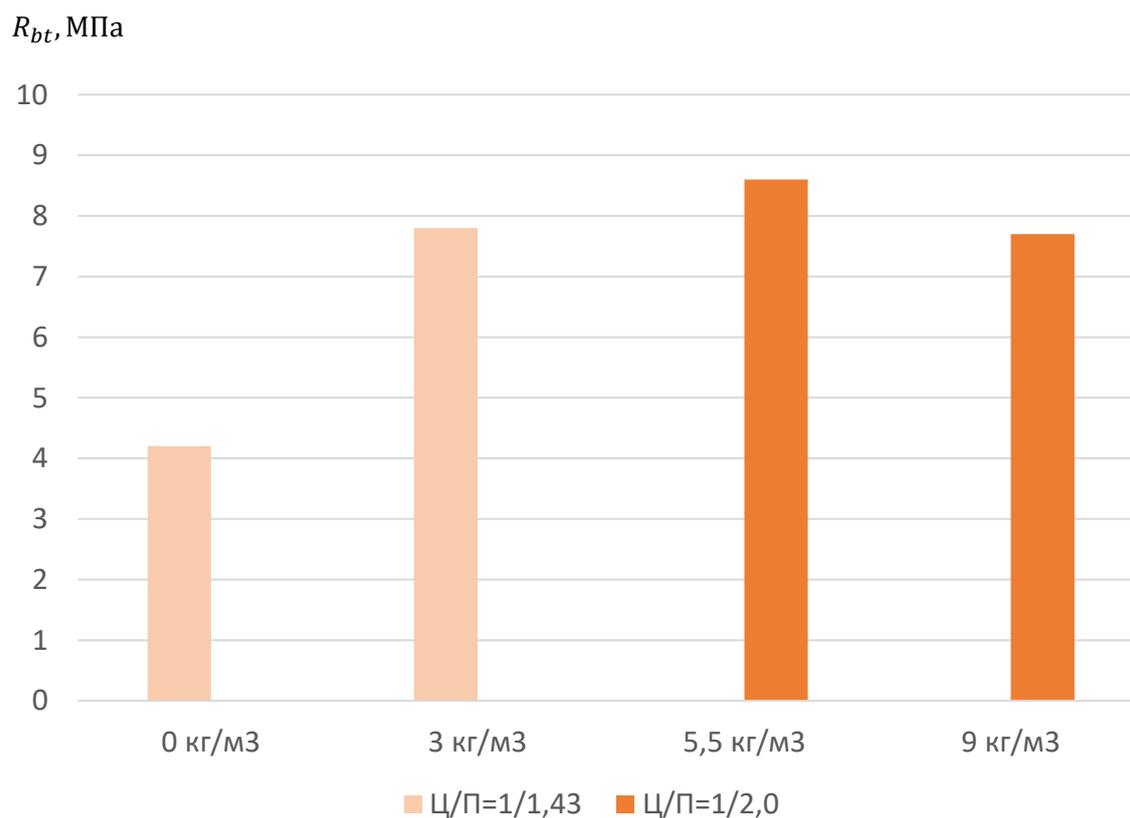


Рисунок 28 – Зависимость прочности фибробетона при растяжении от степени армирования полипропиленовой фиброй и соотношения количества вяжущего к песку

«Испытания образцов на прочность при изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т» [9].

Результаты испытания образцов фибробетонов на металлическом армирующем волокне по прочности при изгибе приведены на рисунке 3.12.

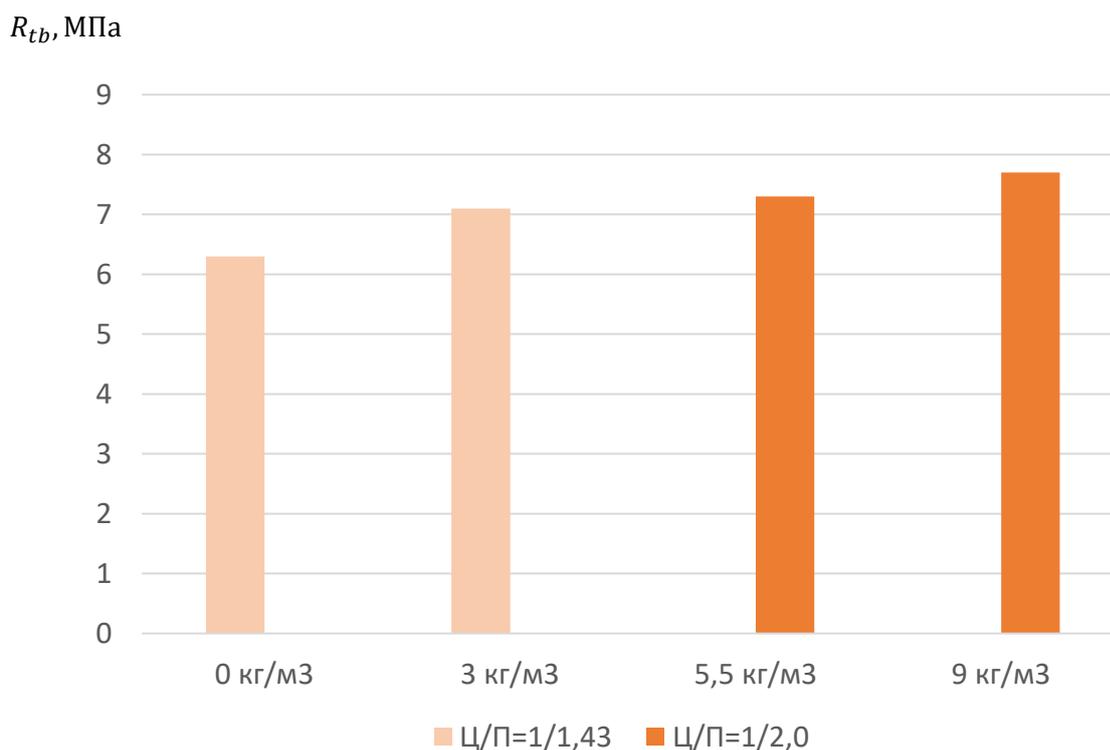


Рисунок 29 – Зависимость прочности фибробетона при изгибе от степени армирования полипропиленовой фиброй и соотношения количества вяжущего к песку

Результаты исследований показывают, что использование полипропиленовых волокон в тяжелых фибробетонах в количестве до 5,5 кг/м<sup>3</sup> увеличивает прочность фибробетона на сжатие на 17% по сравнению с фибробетоном без фибры на всех стадиях твердения фибробетона (7 и 28 суток). «Получен фибробетон класса аналогичного по прочности В35. Дальнейшее увеличение количества фибры до 9 кг/м<sup>3</sup> приводит к снижению прочности как на сжатие, так и на изгиб» [9].

Данные исследований показывают, что «самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны для монолитных конструкций (классом не ниже В35) могут быть изготовлены из доступных в регионе материалов» [9].

«Данный фибробетон отличается повышенной удобоукладываемостью и технологичностью» [4].

### 3.3 Исследование свойств фибробетона с армирующими волокнами из отходов производства

Для вторичного использования строительных материалов крайне важно использовать все отходы производства в качестве компонентов материалов конструктивных элементов зданий и сооружений. Это оказывает благоприятный экономический эффект за счет низкой стоимости отходов производства и отсутствия необходимости их переработки, уничтожения или длительного хранения.

В качестве фиброволокна исследовались отходы производства ООО «АКО» – обрезки стекловолокна, используемого при производстве очистных сооружений поверхностного ливневого стока. Материал отбирался в виде обрезков стеклоткани, не затворенных смолой (Рисунок 30).



Рисунок 30 – Образец стеклоткани, используемой в качестве армирующего волокна

Перед использованием в составе материала исследуемых образцов стеклоткань разбивалась на отдельные волокна и нарезалась отрезками длиной 1-2 см.

3.3.1 Зависимость прочностных показателей фибробетона с армирующими волокнами из отходов производства от содержания армирующего волокна

Для изготовления фибробетонных образцов партий 26 – 29 были использованы портландцемент «Holcim Extracem» ЦЕМ 42,5 Б, природный песок Волжского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=1,3$ , песок Камского месторождения с модулем крупности  $M_{кр.}=3,53$ . Составы бетонных смесей с фиброй из отходов производства для исследуемых образцов в виду общей с полипропиленовой фиброй структурой приняты схожими с образцами серий 18-21 и приведены в таблице 24.

Таблица 24 – Составы исследуемых образцов, изготовленных с использованием фиброволокна из отходов производства

Компонент	Ц/П = 1/1,39			
	№ партии			
	26	27	28	29
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	744	729	728	737
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	517	507	506	512
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	517	507	506	512
Вода, кг/м <sup>3</sup>	372	365	364	369
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	6	6	6	6
Стекловолокно	7	10,5	12	15

«При дозировке полипропиленовой фибры в количестве 15 кг/м<sup>3</sup> прочность образцов фибробетона снижается на 20% по сравнению с прочностью образцов с содержанием фибры в количестве 7 кг/м<sup>3</sup>. При содержании фиброволокна 15 кг/м<sup>3</sup> наблюдалось комкование фибры и неравномерное распределение фиброволокон в объеме бетонной смеси, вследствие чего ухудшалась формуемость образцов» [16].

«Испытания образцов на прочность при сжатии, растяжении и изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т» [9].

Результаты описанных испытаний по пределу прочности при сжатии представлены в виде таблицы 25 и рисунке 31.

Таблица 25 – Пределы прочности при сжатии образцов с фиброй из отходов производства

Возраст	№ партии			
	26	27	28	29
	Ц/П = 1/1,39			
	Предел прочности при сжатии, МПа			
7 суток	28,1	25,8	22,1	23,6
14 суток	36,2	36,1	34,4	31,6
28 суток	44,0	40,4	38,8	33,7
Стекловолокно, кг/м <sup>3</sup>	7	10,5	12	15

Наилучшие показатели по прочности на сжатие в возрасте 28 дней показали образцы с содержанием армирующего волокна в количестве 7 кг/м<sup>3</sup>. При этом характер разрушения схож с образцами из фибробетона на полипропиленовой фибре.

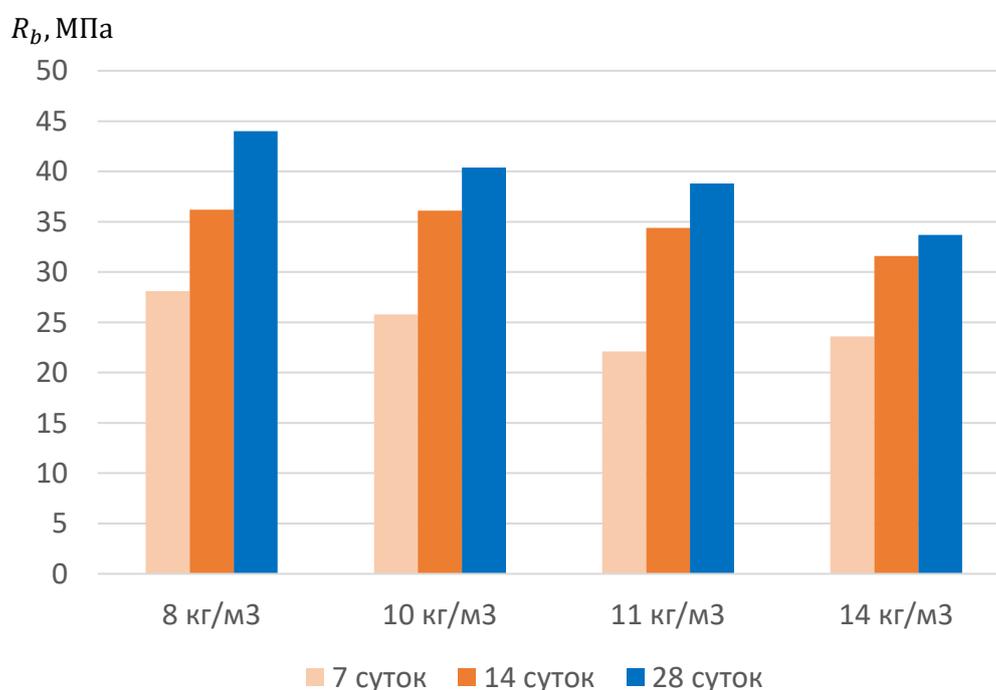


Рисунок 31 – Зависимость прочности фибробетона при сжатии от степени армирования полипропиленовой фиброй

«Испытания образцов на прочность при изгибе выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

Результаты испытания образцов фибробетонов на полипропиленовом армирующем волокне по прочности при изгибе приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Пределы прочности при изгибе образцов с фиброй из отходов производства

Возраст	№ партии			
	26	27	28	29
	Ц/П = 1/1,39			
	Предел прочности при изгибе, МПа			
28 суток	5,8	6,3	6,6	5,8
Стекловолокно, кг/м <sup>3</sup>	7	10,5	12	15

Образцы с фиброй из отходов производства показали наибольшую прочность при изгибе при содержании волокна в количестве 12 кг/м<sup>3</sup>.

Таким образом, оптимальным количеством полипропиленового фиброволокна является его содержание в пределах от 7 кг/м<sup>3</sup> до 12 кг/м<sup>3</sup>.

Характер разрушения образцов из фибробетона с фиброй из отходов производства при испытании по прочности на сжатие показан на рисунке 32.



Рисунок 32 – Характер разрушения образца, армированного полипропиленовой фиброй при испытании по прочности при изгибе

«Испытания образцов на прочность при растяжении выполнялись на прессе, обеспечивающем максимальную нагрузку 125 т с использованием специальных траверс для сосредоточенной передачи нагрузки» [9].

Результаты испытания образцов фибробетонов с армированием фиброй из отходов производства по прочности при изгибе приведены в таблице 27.

Таблица 27 – Пределы прочности при растяжении образцов с армированием фиброй из отходов производства

Возраст	№ партии			
	26	27	28	29
	Ц/П = 1/1,39			
	Предел прочности при растяжении, МПа			
28 суток	5,86	5,74	5,8	5,4
Стекловолокно, кг/м <sup>3</sup>	7	10,5	12	15

Наилучшие прочностные характеристики предела прочности при растяжении имеют образцы фибробетона с армированием фиброй из отходов производства в количестве 10-12 кг/м<sup>3</sup>.

«По результатам экспериментов прочность при сжатии фибробетона с использованием стекловолоконных волокон в 28 – суточном возрасте на 8,3% выше по сравнению с прочностью фибробетона на полипропиленовом волокне. В семисуточном возрасте фибробетон на стекловолокне набирает прочность 70% от марочной» [20].

На рисунках 33 и 34 представлен образцы фибробетонов с отходами производства ООО «АКО».



Рисунок 33 – Образец куба со стекловолокном после испытания

«Фибра из отходов производства эффективно улучшает рабочие характеристики фибробетонов под нагрузками, улучшая сопротивления фибробетона действию растягивающих напряжений и ударному воздействию, что соответствует пластическому характеру разрушения. За счет этого повышается срок эксплуатации и безопасность использования изделий и конструкций из данного фибробетона» [9].



Рисунок 34 – Образец партии №28 после испытания на изгиб

«Сравнивая с полипропиленовой фиброй стеклопластиковые волокна обладают повышенной прочностью на разрыв и когезией с бетоном, это улучшает контроль трещинообразования в среднем на 50%» [14].

### **3.4 Сравнительный расчет момента трещинообразования в конструктивном элементе здания.**

Расчет по образованию трещин производят для проверки необходимости расчета по раскрытию трещин, а также для необходимости учета трещин при расчете по деформациям. Данный расчет сводится к тому, что сравнивается момент, возникающий в элементе от внешних нагрузок  $M$  с предельным моментом трещинообразования  $M_{crc}$ .

«Под непродолжительным раскрытием трещин следует понимать их раскрытие при совместном действии постоянных, длительных и кратковременных нагрузок, под продолжительным раскрытием — только от действия постоянных и длительных нагрузок, без учета кратковременных нагрузок» [4].

Момент трещинообразования определяется по формуле:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} * W_{pl} \pm N * e_x, \quad (2)$$

где:  $M_{crc}$  – момент трещинообразования;

$R_{bt,ser}$  – нормативное сопротивление бетона на растяжение, принимаемое согласно СП или по результатам испытаний, проводимых на образцах, Н/см<sup>2</sup>;

$N$  – продольная сила, расположенная в центре тяжести приведенного сечения элемента;

$e_x$  – расстояние от точки приложения продольной силы до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяется;

$W_{pl}$  – «упругопластический момент сопротивления сечения, см<sup>3</sup>;

$$W_{pl} = W_{red} * \gamma, \quad (3)$$

где:  $W_{red}$  – момент сопротивления сечения, см<sup>3</sup>;

$\gamma$  – коэффициент, учитывающий упругопластические свойства деформирования бетона, принимаемый равным: 1,75 – для элементов прямоугольного профиля и таврового профиля с полкой в сжатой зоне; 1,5 – для элементов коробчатого сечения; 1,3 – для элементов прямоугольного сечения» [4].

«Геометрические характеристики сечения элемента:

– Упругий момент сопротивления сечения:

$$W_{red} = \frac{J_{red}}{y_H}, \quad (4)$$

где:  $J_{red}$  – момент инерции приведенного сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения, см<sup>4</sup>;

$y_H$  – расстояние от низа и верха балки до центра тяжести приведенного сечения ( $y_H = \frac{S_{red}}{A_{red}}$ ;  $y_H = h - y_B$ ), см» [4].

– Площадь приведенного сечения:

$$A_{red} = b * h + \alpha * A_s; \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b}, \quad (6)$$

где:  $\alpha$  – коэффициент приведения площади арматуры к площади бетона;

$E_s$  и  $E_b$  – соответственно модули упругости арматуры и бетона, принимаемые согласно СП или по результатам испытаний, проводимых на образцах, Мпа;

$A_s$  – площадь растянутой арматуры, см<sup>2</sup>;

– Статический момент сечения относительно нижней грани сечения балки:

$$S_{red} = \frac{b * h^2}{2} + \alpha * A_s * a_s, \quad (7)$$

где:  $a_s$  – расстояние от нижней растянутой грани до центра тяжести растянутой арматуры;

Последовательность практического расчета по образованию нормальных трещин на примере железобетонной балки прямоугольного сечения с одиночной арматурой.

– Определяется коэффициент приведения площади арматуры к бетону.

– Определяется площадь приведенного сечения.

– Определяется статический момент сопротивления приведенного сечения.

– Определяются координаты центра тяжести сечения.

– Определяется момент инерции приведенного сечения.

– Определяется упругий момент сопротивления приведенного сечения.

– Определяется упругопластический момент сопротивления приведенного сечения.

– Определяется момент, воспринимаемый сечением при образовании нормальных трещин.

Исходными данными для расчетов являются результаты испытаний фибробетонов серий 2 – 29 и бетона контрольной серии бетона 1. Сечение рассчитываемой балки приведено на рисунке 35.

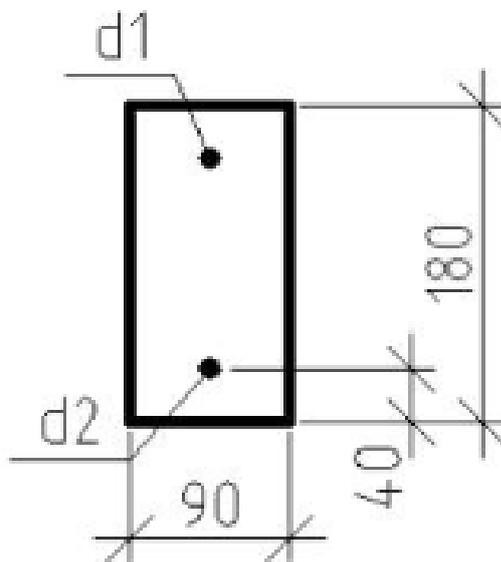


Рисунок 35 – Сечение рассчитываемой балки

Стержневая арматура принята класса А400, диаметр стержня  $d_1$  принят равным 10 мм, диаметр стержня  $d_2$  принят равным 12 мм.  $E_s = 200000$  МПа. Значение модулей упругости бетонов определено расчетом в соответствии с методикой СП 360.1325800.2017 и СП 297.1325800.2017 и приведено в таблице 28. Модуль упругости фиброволокна принят исходя из предоставленных производителем паспортов.

Таблица 28 – Расчетные показатели для расчета трещиностойкости балки

Показатель для расчета	№ партии					
	1	2	10	18	24	26
$R_{bt,ser}$ , МПа	2,27	4,35	5,69	5,6	5,9	5,6
Модуль упругости армирующего волокна	-	185000	185000	35000	35000	75000
$E_b$ , МПа	32500	33165	34710	32508	32506	32874

В соответствии с приведенной выше методикой выполнен расчет момента трещинообразования описанной выше балки при ее работе в качестве изгибаемого ригеля. Результаты расчета и расчетов промежуточных параметров сведены в таблицу 29.

Таблица 29 – Значения результатов расчета момента трещинообразования

Показатель для расчета	№ партии					
	1	2	10	18	24	26
$A_{red}, \text{см}^2$	168,96	168,82	168,52	168,96	168,96	168,88
$S_{red}, \text{см}^3$	1485,84	1485,28	1484,07	1485,83	1485,84	1485,52
$y_t, \text{см}$	8,8	8,8	8,81	8,79	8,79	8,79
$I_{red}, \text{см}^4$	8427,90	8424,06	8424,06	8427,56	8427,56	8425,26
$W_{red}, \text{см}^3$	958,37	957,50	956,56	958,32	958,32	957,82
$M_{crc}, \text{кН} * \text{м}$	2,81	5,41	7,07	6,96	7,30	6,96

В соответствии с результатами проведенных расчетов, можно наблюдать повышение момента трещинообразования при добавлении армирующего фиброволокна в различных пропорциях. Данный показатель напрямую зависит от прочности на растяжение соответствующих испытанных серий образцов. При добавлении в бетонную матрицу армирующего волокна удалось добиться более чем трехкратного повышения трещиностойкости рассмотренной изгибаемой конструкции.

Сравнение между собой образцов различных партий фибробетона дает понимание, что конструкция, изготовленная с применением в составе отходов производства ООО «АКО» также имеет более высокие показатели трещиностойкости, чем конструкция из железобетона с применением состава бетона серии №1. Это говорит о том, что использование измельченного стекловолокна может быть рассмотрено как способ повышения момента трещинообразования в конструкциях, которые этого требуют.

### 3.5 Техничко – экономическое обоснование использования фибробетона на основе металлической, полипропиленовой фибры и фибры из отходов производства

На данный момент в строительстве не последнюю роль играет использование методов наиболее выгодных с точки зрения технико-экономических показателей. «Основной целью таких методов являются снижение себестоимости строительства, упрощение технологии производства и экономия ресурсов» [7].

Себестоимость производства фибробетона складывается из стоимости исходных сырьевых компонентов. Стоимость для расчета принята в соответствии с действующими прайсовыми расценками, предоставленными актуальными на 26.12.2022 г.

Стоимость 1 м<sup>3</sup> сталефибробетонов серий 2 и 10, показавших наилучшие показатели прочности среди испытываемых образцов на металлической фибре приведена в таблицах 30 и 31.

Таблица 30 – Стоимость материалов для приготовления одного кубического метра фибробетона серии №2 с металлической фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб/т.	Стоимость всего, руб.
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	0,735	6 500	4 777,5
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	0,511	780	398,58
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	0,511	650	332,15
Вода, кг/м <sup>3</sup>	0,367	23,51	8,63
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	0,006	146 200	877,20
Металлическая фибра	0,034	69 000	2 346,00
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона серии №2:			8 740,06

Таблица 31 – Стоимость материалов для приготовления одного кубического метра фибробетона серии №10 с металлической фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб/т.	Стоимость всего, руб.
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	0,705	6 500	4 582,50
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	0,237	780	184,86
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	0,237	650	154,05
Вода, кг/м <sup>3</sup>	0,473	23,51	11,12
Пластифицирующая добавка «СТАСЕМЕНТ 2280», кг/м <sup>3</sup>	0,01	146 200	1 462,00
Металлическая фибра	0,113	69 000	7 797,00
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона серии №10:			14 191,53

Стоимость 1 м<sup>3</sup> фибробетонов серий 18 и 24, показавших наилучшие показатели прочности среди испытываемых образцов на полипропиленовой фибре приведена в таблицах 32 и 33.

Таблица 32 – Стоимость материалов для приготовления одного кубического метра фибробетона серии №18 с полипропиленовой фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб/т.	Стоимость всего, руб.
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	0,744	6 500	4 836,00
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	0,517	780	403,26
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	0,517	650	336,05
Вода, кг/м <sup>3</sup>	0,372	23,51	8,75
Пластифицирующая добавка «СТАСЕМЕНТ 2280», кг/м <sup>3</sup>	0,006	146 200	877,20
Полипропиленовая фибра	0,008	540 000	4 320,00
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона серии №18:			10 781,26

Таблица 33– Стоимость материалов для приготовления одного кубического метра фибробетона серии №24 с полипропиленовой фиброй

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб/т.	Стоимость всего, руб.
1	2	3	4
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	0,490	6 500	3 185,00
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	0,490	780	382,20

Продолжение таблицы 33

Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	0,490	650	318,50
Вода, кг/м <sup>3</sup>	0,341	23,51	8,02
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	0,006	146 200	877,20
Полипропиленовая фибра	0,0055	540 000	1 782,00
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона серии №24:			7 740,92

Розничная стоимость стеклоткани, используемой в производстве стеклопластиковых очистных сооружений компании ООО «АКО» составляет 520 000 рублей 00 копеек с учетом НДС в соответствии с прайс-листом производителя от 26.12.2022 г. По итогам диалога проведенного с представителями ООО «АКО», установлена стоимость за стеклоткань в виде отходов производства (обрезков, не затворенных смолой) в размере 10% от розничной – 52 000 рублей 00 копеек.

Стоимость 1 м<sup>3</sup> фибробетона серии 26, показавшего наилучшие показатели прочности среди испытываемых образцов на фибре из отходов производства приведена в таблице 34.

Таблица 34 – Стоимость материалов для приготовления одного кубического метра фибробетона серии №26 с фиброй из отходов производства

Наименование материала	Расход на 1 м <sup>3</sup> , т	Стоимость без НДС, руб/т.	Стоимость всего, руб.
Цемент «Holcim», кг/м <sup>3</sup>	0,744	6 500	4 836,00
Песок «Волжский», кг/м <sup>3</sup>	0,517	780	403,26
Песок «Камский», кг/м <sup>3</sup>	0,517	650	336,05
Вода, кг/м <sup>3</sup>	0,372	23,51	8,75
Пластифицирующая добавка «STACHEMENT 2280», кг/м <sup>3</sup>	0,006	146 200	877,20
Стекловолокно	0,008	52 000	416,00
Стоимость 1 м <sup>3</sup> фибробетона серии №26:			6 877,26

Для проведения объективного технико-экономического сравнения составлено сопоставление стоимости конечного материала – фибробетона серий 2, 10, 18, 24, 26, его прочностных показателей и момента

трещинообразования рассмотренного конструктивного элемента здания. Данное сопоставление представлено в таблице 35.

Таблица 35 – Сопоставление экономических и прочностных показателей бетонов

Показатель для расчета	№ партии				
	2	10	18	24	26
$R_{bt,ser}$ , МПа	4,35	5,69	5,6	5,9	5,6
$M_{crC}$ , кН * м	5,41	7,07	6,96	7,30	6,96
Стоимость 1 м <sup>3</sup> , руб	8740,06	14191,53	10781,26	7740,92	6877,26

По итогам проведенного сравнения можно наблюдать, что наиболее экономичным является фибробетон с армирующим волокном из отходов производства. По своим прочностным показателям он не уступает более дорогим составам при наименьшей стоимости 1 м<sup>3</sup> смеси.

Наиболее высокую стоимость при сравнимых с остальными видами имеет фибробетон на металлической фибре партии №10. Данный состав при наибольших денежных затратах, однако пользуется спросом за счет большей долговечности конечного изделия. «Чаще всего используется в строительстве для изготовления фундаментов под оборудование и наливных полов промышленных зданий» [6].

Как свидетельствуют данные, «можно получить выгодные и качественные фибробетоны с использованием отходов промышленного производства за счет снижения себестоимости, не снижая при этом прочностные характеристики» [17].

### 3.6 Выводы по главе

Итогом исследовательской и расчётной работы определено следующее:

- Добавление армирующей фибры в состав материала несущих конструкций зданий и сооружений благотворно влияет на их прочностные

характеристики и эксплуатационные показатели. Данные составы целесообразно применять как основной материал при строительстве;

- Расчет момента трещинообразования изгибаемой конструкции рассчитанный в соответствии с методикой действующей нормативной документации при равных сечениях и армировании идентичной арматурой и фиброй показывает, что конструкция, изготовленная с применением в составе отходов производства ООО «АКО» также имеет более высокие показатели трещиностойкости, чем конструкция из железобетона с применением состава бетона серии №1. Это говорит о том, что использование измельченного стекловолокна может быть рассмотрено как способ повышения момента трещинообразования в конструкциях, которые этого требуют.

- «Можно получить выгодные и качественные фибробетоны с использованием отходов промышленного производства за счет снижения себестоимости, не снижая при этом прочностные характеристики» [5]. Приведены характеристики отдельных компонентов фибробетона с подробным анализом физических свойств, состава и эффекта, достигаемого при включении данного компонента в общую смесь.

## Заключение

Из результатов проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

– Рассмотрены теоретические аспекты производства фибробетонов и несущих элементов зданий из фибробетона.

– Проведен анализ прочностных и физико-механических свойств дисперсно-армированного бетона на основе фибры различного происхождения и различной природы. Получены численные значения прочности исследуемых составов по прочности на сжатие, растяжение и изгиб.

– Проведен анализ зависимости сроков твердения дисперсно-армированного фибробетона от вида и количества используемого армирующего волокна, включаемого в состав.

– Экспериментально выведен состав фибробетона с наилучшими показателями прочности при сжатии, растяжении и изгибе. Это показывает, что «самоуплотняющиеся мелкозернистые фибробетоны для монолитных конструкций (классом не ниже В35) могут быть изготовлены из доступных в регионе материалов» [9].

– Рассчитана зависимость показателя момента трещинообразования от добавления армирующей фибры в состав материала несущих конструкций зданий и сооружений в различных концентрациях при сохранении общих габаритов сечения и диаметров стержневой арматуры.

Наблюдается повышение момента трещинообразования при добавлении армирующего фиброволокна в различных пропорциях. Данный показатель напрямую зависит от прочности на растяжение соответствующих испытанных серий образцов. При добавлении в бетонную матрицу армирующего волокна удалось добиться более чем трехкратного повышения трещиностойкости рассмотренной изгибаемой конструкции.

– Экспериментально доказано, что конструкция, изготовленная с применением в составе отходов производства ООО «АКО» также имеет более высокие показатели трещиностойкости, чем конструкция из железобетона с применением состава бетона серии №1. Это говорит о том, что использование измельченного стекловолокна может быть рассмотрено как способ повышения момента трещинообразования в конструкциях, которые этого требуют.

– Рассчитаны технико-экономические показатели различных составов фибробетона.

По итогам проведенного сравнения можно наблюдать, что наиболее экономичным является фибробетон с армирующим волокном из отходов производства. По своим прочностным показателям он не уступает более дорогим составам при наименьшей стоимости 1 м<sup>3</sup> смеси. «Можно получить выгодные и качественные фибробетоны с использованием отходов промышленного производства за счет снижения себестоимости, не снижая при этом прочностные характеристики» [5].

## Список используемой литературы

1. Aarup, B., «Fibre Reinforced High Performance Concrete for Precast Applications» Proceedings of the Second International Symposium on Prefabrication, 17 – 19 May 2000, Helsinki, Finland, Concrete Association of Finland, pp. 173 – 178.
2. Archanaa Dongre, “FIBRE REINFORCED CONCRETE- A CASE STUDY” Conference: 33rd national Convention of Architectural Engineers and National Seminar on "Architectural Engineering Aspect for sustainable building envelopes" ArchEn-BuildEn-2017, by Institution of Engineers India in Association with Indian Association of structural Engineers At: Institution of Engineers, Khairatabad, Hyderabad, 2017, pp 21-37.
3. Ille, K. and Parra – Montesinos, G., «Effect of Beam Size, Casting Method, and Support Conditions on Flexural Behavior of Ultra – High-Performance Fiber – Reinforced Concrete» ACI Materials Journal, Vol. 109, No. 3, May – June 2012, pp. 379 – 388.
4. Kharun M., Koroteev D. D., «Basalt Fiber; High-Strength Concrete; Compressive Strength; Tensile Strength At Bending; Strength At Axial Tension; Cracking Moment» journal of mechanics of continua and mathematical sciences, 2019, inst mechanics continua & mathematical sciences, pp. 10-30.
5. Smirnova O., Kharitonov A., Belentsov Y., “Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete” Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition), Volume 6, Issue 4, August 2019, pp. 407-417.
6. Yuri V. Pukharenko, Mikhail I. Zhavoronkov, Dmitry A. Pantelev, “Improvement of methods for determining power and energy characteristics of fibre-reinforced concrete crack resistance” Vestnik MGSU, 2019, pp. 301-310.
7. Анохин К. А. Использование дисперсно-армированного фибробетона при возведении фундаментов емкостей локальных очистных

сооружений // Студенческий вестник: электрон. научн. журн. 2023. № 14(253). URL: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/253> (дата обращения: 27.04.2023).

8. Анохин К. А., Шишканова В. Н. Зависимость прочностных характеристик фибробетона от косвенных параметров // Студенческие дни науки в ТГУ – 2022: научно-практическая конференция : Тольятти, 4 – 29 апреля 2022 года : Сборник студенческих работ. Тольятти. 2023.

9. Анохин К. А., Шишканова В. Н. Об использовании в качестве армирующей фибры отходов производства - измельченного стекловолокна // Студенческий вестник: электрон. научн. журн. 2023. № 16(255). URL: <https://studvestnik.ru/journal/stud/herald/255> (дата обращения: 19.05.2023).

10. Баженов Ю. М., Фаликман В. Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии - Научно-исследовательский центр "Строительство", (НИИЖБ) Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона им. А. А. Гвоздева. – 2001 г. – 326 с.

11. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. М. : Стандартинформ, 2016. – 25 с.

12. ГОСТ 34028-2016. Прокат арматурный для железобетонных конструкций. Технические условия. – Введ. 2019-01-01. – М. : Межгосударственный советом по стандартизации, метрологии и сертификации, Госстрой России, 2019. – 42 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200144936> (Дата обращения 05.12.2021).

13. Ключев С. В. Фибробетон для тяжелонагруженных полов промышленных зданий [Текст]: монография. Белгород. Белгородский гос. технологический ун-т (БГТУ) им. В. Г. Шухова, 2013 – 115 с.

14. ОДМ 218.2.014-2011 Методические рекомендации по применению сталефибробетона при ремонте мостовых сооружений. [Текст]. – введ. 30.12.2011. М. : ФГУП "ИНФОРМАВТОДОР". 2012. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200102834> (Дата обращения 05.05.2022).

15. Пат. RU 25483035 Россия, МПК C04B 28/04, C04B 111/20. Высокопрочный легкий фибробетон. / Иноземцев А. С.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный строительный университет" (ФГБОУ ВПО "МГСУ") – № 2014114357/03; заявл. 11.04.2014; опубл. 20.04.15, Бюл. – 6 с
16. Пухаренко Ю. В. Железобетонные изделия и конструкции: Научно – технический справочник / Ю. В. Пухаренко, Ю. М. Баженова, В. Т. Ерофеева // – СПб. : НПО «Профессионал», 2013. – 1045 с.
17. Пухаренко, Ю. В. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры / Ю. В. Пухаренко, У. Х. Макдеев, В. И. Морозов и др. // Вестник ВолГАСУ. Строительство и архитектура. – 2013. – Вып. 31 (50). – с. 132 – 136.
18. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. М. : Издательство АСВ, 2004. – с. 201.
19. Руководство «Фибробетон». Австрийская ассоциация бетона и строительных технологий – 2008 г. – 40 с.
20. Соловьёв В. Г. Эффективность применения различных видов фибры в бетонах // Международный научно-исследовательский журнал. — 2017. — № 09 (63) Часть 3. – с. 78 – 81.
21. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85\* (с Изменением N 1) [Текст]. – введ. 04.06.2017. М. : Стандартинформ, 2018 год – 86 с.
22. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83. [Текст]. – введ. 17.06.2017. М.: Минстрой России, 2016 – 220 с.
23. СП 297.1325800.2017. Конструкции фибробетонные с неметаллической фиброй. Правила проектирования. [Текст]. – введ.

18.10.2017. М. : Стандартиформ, 2017. 50 с. URL: <https://docs.cntd.ru/document/555600925> (Дата обращения 05.12.2021).

24. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции. [Текст]. – введ. 01.09.2006. М. : ФГУП «НИЦ «Строительство», 2006 год – 68 с. URL: [http://helpeng.ru/template/library/sp/sp\\_52-104-2006.pdf](http://helpeng.ru/template/library/sp/sp_52-104-2006.pdf) (Дата обращения 05.12.2021).

25. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. [Текст]. – введ. 20.06.2019. М. : Минстрой России, 2020. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (Дата обращения: 12.11.2021).

26. Талантова К. В. Сталефибробетон. Конструкции. Терминология. Вестник Евразийской науки, 2020 №4.

27. Талантова К. В., Михеев Н. М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций. К. В. Талантова, Н. М. Михеев – Ползуновский вестник. 2011. – №1. – с. 194 – 199.

28. Фиговский О. Л. Успехи применения нанотехнологий в строительстве / О. Л. Фиговский, Д. А. Бейлин, А. Н. Пономарев // Нанотехнологии в строительстве: научный Интернет-журнал. М. : ЦНТ «НаноСтроительство». 2012. № 3. с. 6 – 22.

29. Черепанова Е. Е., Полетаева Е. С. Новшества в строительстве: Фибробетон // Сборник трудов конференции. Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Самара. 2013. – с. 42 – 46.

30. Шляхтина Т. Ф. Особенности подбора составов дисперсноармированных бетонов / Т. Ф. Шляхтина. Ленинград: ЛенЗНИИЭП, 1982. 91 с.