

**ГАЖК «УЗБЕКИСТОН ТЕМИР ЙУЛЛАРИ»  
ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИНЖЕНЕРОВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА**

**Кафедра «Строительство зданий и промышленных сооружений»**

*На правах рукописи*  
УДК 691.115:674.816.2

**Бегматов Сухроб Хасанович**

**ФИБРОБЕТОН С БАЗАЛЬТОВЫМ ДИСПЕРСНО-ВОЛОКНИСТЫМ  
НАПОЛНИТЕЛЕМ**

Специальность:

5А580204 – «Проектирование строительных конструкций»

**ДИССЕРТАЦИЯ**

представлена на соискание степени магистра

Диссертация рассмотрена и  
рекомендована к защите  
зав. кафедрой «СЗиПС»

**доц. Щипачева Е.В.**

«\_\_» \_\_\_\_ 2012 г.

Научный руководитель

**доц. Махаматалиев Э.М.**

Ташкент - 2012

## Содержание

Наименование разделов	Стр.
<b>Введение</b>	3
<b>Глава 1. Современное состояние вопроса использования фибробетонов в строительстве</b>	7
1.1. Использование минеральных наполнителей-эффективный путь в развитии технологии цементных бетонов	7
1.2. Современное состояние развития технологии фибробетонов	13
1.3. Цель и задачи исследований	21
<b>Глава 2. Характеристика исходных материалов и выбор методов исследований</b>	24
2.1. Характеристика исходных материалов	24
2.2. Методы исследований, приборы и оборудование	30
<b>Глава 3. Исследование свойств цементного вяжущего с базальтовым дисперсно-волоконистым наполнителем</b>	38
3.1. Исследование химического взаимодействия базальтового наполнителя с продуктами гидратации цемента	38
3.2. Исследование влияния базальтового наполнителя на прочностные свойства цементного камня (базальтофиброцемента)	41
Выводы по главе 3	47
<b>Глава 4. Исследование свойств бетонной смеси и бетона с базальтовым дисперсно-волоконистым наполнителем</b>	48
4.1. Исследование свойств бетонной смеси с базальтовым наполнителем	48
4.2. Исследование свойств бетона с базальтовым наполнителем	49

4.3. Оптимизация состава бетона с базальтовым наполнителем	51
Выводы по главе 4	55
<b>Глава 5. Технология получения фибробетона с базальтовым дисперсно- волокнистым наполнителем</b>	56
5.1. Технология получения фибробетона с базальтовым дисперсно- волокнистым наполнителем	56
5.2. Рекомендации по производству фибробетона с базальтовым наполнителем	57
Выводы по главе 5	60
<b>Общие выводы по диссертации</b>	61
<b>Список использованной литературы</b>	64

## Введение

**Актуальность работы.** Бетон в современном строительстве является самым популярным материалом. С использованием бетона архитекторы и строители возводят необыкновенные по форме, красоте и прочности здания и сооружения, осваивают все новые и новые области строительства. По данным специалистов, ежегодное производство бетона во всем мире достигает 2 млрд. куб.м., что намного превышает выпуск других видов промышленной продукции и строительных материалов [6].

В Республике Узбекистан, где за годы независимости объемы инвестиций направленные в капитальное строительство возросли в несколько раз, потребность в производстве монолитных и сборных бетонных и железобетонных конструкций остается на стабильно высоком уровне. При этом для дальнейшего повышения эффективности капитальных вложений в строительную отрасль необходимо решить вопрос снижения стоимости строительства. Решение проблемы снижения стоимости строительства при обеспечении нормативного уровня качества продукции в нашей стране в основном связана с разработкой и применением эффективных строительных материалов на основе местного сырья. В этом отношении бетон является одним из наиболее перспективных видов строительных материалов, как в следствие неограниченных возможностей использования местных строительных материалов, так и по возможности придания конструкциям на его основе практически любых архитектурных форм.

В настоящее время в технически развитых странах мира все большее внимание уделяется развитию технологии фибробетона, особенно стеклофибробетона, изучению и улучшению его физико-технических и деформативных характеристик. Однако, недостаточная изученность стойкости волокон в цементной матрице бетона ограничивает области и

объёмы применения фибробетона в строительстве.

Одним из перспективных направлений в исследовании технологии фибробетона является обоснование эффективности использования в качестве дисперсной арматуры базальтового волокна. Как известно, базальтовое волокно отличается не только своими высокими физико-механическими свойствами, но и повышенной химической стойкостью, температура - света и атмосферостойкостью, и что также немаловажно, простотой технологии производства и невысокой стоимостью.

В Узбекистане использованию фибробетона в строительстве пока не уделяется достаточного внимания, из-за не достаточной изученности его свойств и технологии получения, отсутствием сведений о наличии сырьевой базы волокнистых наполнителей и недостаточной обоснованности эффективных областей его использования. Учитывая то, что в Узбекистане (в городе Навои) освоено производство базальтового волокна, а также то, что строительная отрасль Узбекистан нуждается в новых современных эффективных конструкционных строительных материалах, нами было принято решение в качестве темы магистерской диссертации выбрать нижеследующую тему: «Фибробетон с базальтовым дисперсно-волокнурым наполнителем».

Настоящая магистерская диссертация направлена на обоснование возможности использования местного базальтового волокна (производство освоено в г.Навои) в качестве дисперсно-волокнустого наполнителя для производства базальтофибробетона, исследование его строительнотехнических свойств и уточнение областей эффективного его использования в строительной отрасли.

Поэтому перед настоящей научно-исследовательской работой была поставлена задача проведения комплекса экспериментально-теоретического исследований по изучению свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с использованием в качестве дисперсно-

волокнистого наполнителя Навоийского базальтового волокна, уточнению механизма и роли влияния этого наполнителя на свойства цементных систем, оптимизации составов базальтофибробетона и определению рациональных областей его применения строительной отрасли с целью достижения максимальной эффективности от инновационной идеи.

**Целью настоящей диссертационной работы** является проведение комплекса экспериментально-теоретических исследований по обоснованию возможности использования местного базальтового волокна (производство освоено в городе Навои) в качестве дисперсно-волокнистого наполнителя для получения базальтофибробетона, изучению свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с использованием базальтового дисперсно-волокнистого наполнителя, оптимизации состава базальтофибробетона, а также уточнению рациональных областей применения разработанного базальтофибробетона в строительной отрасли Узбекистана.

**В частности, предстоит решить следующие задачи:**

1. Определение свойств Навоийского базальтового волокна как дисперсно-волокнистого наполнителя для базальтофибробетона.
2. Выбор методики экспериментальных исследований свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с применением базальтового дисперсно-волокнистого наполнителя.
3. Выполнение экспериментальных исследований по определению основных свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с базальтовым дисперсно-волокнистым наполнителем.
4. Подбор оптимального состава базальтофибробетона с использованием метода математического планирования экспериментов.
5. Разработка рекомендаций по освоению технологии базальтофибробетона на основе местного базальтового волокна .

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. На основании проведенного комплекса экспериментально-

теоретических исследований цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона установлены закономерности влияния дисперсно-волокнутого наполнителя Навоийского базальтового волокна на свойства цементных материалов.

2. На основании разработанных математических моделей выявлены зависимости изменения прочностных свойств базальтофибробетона от рецептурно - технологических параметров.

3. Подобран оптимальный состав базальтофибробетона с использованием Навоийского базальтового волокна.

**Практическое значение** проведенных исследований заключается в том, что в результате обобщения экспериментальных и теоретических исследований разработаны практические предложения и рекомендации по получению базальтофибробетона на основе местного дисперсно-волокнутого наполнителя- Навоийского базальтового волокна.

**Апробация работы.** Основное содержание работы докладывались:

- на научно-технических конференциях ТашИИТа(2011-2012гг.);
- на заседаниях кафедры "Строительство зданий и промышленных сооружений" ТашИИТа(2011-2012гг.);

**Объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов и списка литературы из наименований, из которых – зарубежная литература, работа изложена на страницах, она содержит таблицы и рисунков.

Работа выполнена в 2011-2012 гг. на кафедре " Строительство зданий и промышленных сооружений" ТашИИТа.

## **ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ФИБРОБЕТОНОВ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

### **1.1. Использование минеральных наполнителей -эффективный путь в развитии технологии цементных бетонов**

Современное строительство неразрывно связано с задачами повышения эффективности строительного производства, снижения стоимости и трудоемкости технологических процессов, экономного использования материальных и энергетических ресурсов, применения новых прогрессивных материалов [3]. Рубеж XXI века в строительной отрасли проявился значительными достижениями [4].

Мировые тенденции строительства зданий с повышенной этажностью и других высоконагруженных сооружений, таких как большепролетные мосты, морские нефтяные платформы и др., связаны с применением бетонов с ранее недостижимым комплексом свойств, включающих: высокую прочность (класс В80 и выше), трещиностойкость и долговечность, с большой подвижностью исходной бетонной смеси [8].

Таким образом, по мнению ряда учёных-исследователей получение сверхвысокопрочных бетонов возможно при условии отказа от крупного заполнителя, имеющего максимальную прочность на сжатие 120-130МПа и обладающего при этом высокодефектной структурой [12].

На данный момент сверхвысокопрочные бетоны по фракционному составу заполнителей можно разделить на два вида [14]: мелкозернистые бетоны с максимальной крупностью зерна 5-1,5мм и тонкозернистые бетоны с размером зерна менее 1,5мм. Однако мало сведений о фракционном составе рекомендуемых заполнителей. В основном речь идет о применении различных видов суперпластификаторов и их влиянии на технологические свойства смесей. Для повышения прочности на растяжение, трещиностойкости, ударной прочности рекомендуется фибра: стальная, стеклянная и полимерная.

Мировая практика строительства выявила фибробетон как один из перспективных строительных материалов XXI века. Опыт таких развитых стран, как США, Великобритания, Япония, Германия, Италия, Франция и Австралия [3], убедительно показал технико-экономическую эффективность

применения фибробетона в строительных конструкциях и сооружениях. Возрос объем научно-технических публикаций, посвященных различным аспектам дисперсного армирования строительных материалов [7]. Регулярно проводятся конференции и научно-технические семинары, на которых докладываются результаты научно-исследовательских работ, а также вопросы практического использования дисперсно-армированных бетонов в строительстве [5]. Этой же проблеме были посвящены международные конгрессы и симпозиумы [10].

За рубежом наиболее часто фибробетоны применяют при строительстве туннелей, мостов и дорог, возведении морских платформ нефтедобывающих и перекачивающих станций, также в устройстве полов промышленных зданий и сооружений [10]. В Японии широко применяется фибробетон для возведения зданий в сейсмоопасных районах.

Значимыми примерами использования фибробетонов можно считать: газопроводные туннели под дном Северного моря в Норвегии; множество железнодорожных туннелей в Канаде, автомобильный тоннель протяженностью около 6,5 км, проложенный на глубине до 1 км в Японии и т.п. [72].

Фирмы "Alfanor" и "NorcemCement" (Норвегия) изготовили опытные партии сталефибробетонных труб диаметром 800 мм, предназначенных для отвода промышленных и других сточных вод [34]. В Австралии одной из основных областей применения сталефибробетона является устройство покрытий дорог и тротуаров с интенсивным движением людей и транспорта, полы цехов заводов и фабрик, тротуары, дорожные покрытия) [30]. В Германии свыше 25% индустриальных полов возведено из сталефибробетона [68].

В последние годы в зарубежной практике всё большее применение находят фибробетоны с армированием из синтетических волокон, в т.ч. высокопрочными и высококомодульными, коррозионно-стойкими во многих средах [43]. Дисперсно-волоконистые наполнители находят применение в бетоне для

промышленных складов, гидротехнических сооружений, наружных площадок, в бетонных плитах перекрытий, объектах нефтехимической промышленности, мостах, монолитных конструкциях, бетонных плитах фундаментов, железобетонных сваях, прессованных и отливаемых изделиях, в строительных растворах и штукатурке, торкретбетоне, в декоративном бетоне, в материалах для ремонта бетона, а также в местах повышенной сейсмической активности [60].

Над созданием дисперсно-армированных бетонов и конструкций на их основе, теорий расчета и проектирования фибробетонных конструкций работали и работают многие зарубежные ученые: В.В. Бабков, Ю.М. Баженов, О.Я. Берг, Г.П. Бердичевский, В.М. Бондаренко, И.В.Волков, А.А. Гвоздев, Ю.В. Зайцев, Л.Г. Курбатов, Б.А. Крылов, И.А. Лобанов, К.В., Михайлов, Р.Л. Маилян, Л.Р. Маилян, Р.А. Малинина, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабинович, Б.Г. Скрамтаев, К.В.Талантова, Т.К. Хайдуков, М.М. Холмян-ский, В.П. Харчевников, Ф.П. Янкелевич, Е.М. Чернышов и зарубежные ученые - Э. Ву, Г.С. Холистер, СТ. Милейко, Дж. Купер и др.

Имеется достаточно широкий опыт применения фибробетона и в строительной отрасли России. Были разработаны и применены фибробетоны на стальной, стеклянной, базальтовой и полипропиленовой фибре. Перечень эффективно апробированных конструкций из фибробетонов приведен в табл. 1.1. [40].

Таблица 1.1.

Использование фибробетонов в строительстве.

Монолитные конструкции и	Сборные элементы и
--------------------------	--------------------

сооружения	конструкции
Покрытия автомобильных дорог	Железнодорожные шпалы
Фундаменты и несущий каркас зданий повышенной этажности	Трубопроводы
Промышленные полы	Балки
Самонивелирующиеся полы промзданий с тяжёлым режимом эксплуатации	Ступени
Мостовые настилы	Стеновые панели
Ирригационные каналы	Кровельные панели и черепица
Монолитные конструкции и сооружения	Сборные элементы и конструкции
Морские сооружения	Модули плавящихся доков
Водоотводные дамбы	Взрывоустойчивые конструкции
Огнезащитная штукатурка	Плиты аэродромных покрытий,креплений каналов
Обделки тоннелей	Сваи, шпунты
Пространственные покрытия и сооружения	Элементы пространственнх покрытий и сооружений
Оборонные сооружения	Уличная фурнитура

В странах ближнего зарубежья, например, в России использование фибробетона сводится, в основном, к изготовлению сборных конструкций и практически не применяется в монолитном строительстве [12]. Впервые в России фибробетон был применен в Ленинграде в 1979г. при устройстве днища резервуара технической воды. Расход фибры составлял 1,5% по объему бетонной смеси [57].

В основном исследования проводились в области применения и расчета конструкций из стелефибробетона [68]. Подготовлена необходимая для массового внедрения нормативная база по технологии приготовления, расчету и проектированию таких бетонов [66].

Ремонт поверхности водосливов плотин и напорных тоннелей также осуществляется с применением бетона, армированного стальными волокнами. Добавление в бетонную смесь примерно 1% по объему стальных волокон позволяет полностью избежать возникновения трещин в отремонтированных наружных стенах [58].

ЦНИИпромзданий и ЦНТИ Госгражданстроя разработали каталоги композиционных материалов, технологий для их производства и конструкций из бетона, армированного высокопрочными волокнами (стальными, стеклянными, базальтовыми) для зданий и сооружений промышленного, гражданского, жилищного и сельскохозяйственного назначения [18].

Сегодня достаточно изучены фибробетоны на основе стальных, стеклянных и целлюлозных волокнах, менее - дисперсно- армированные бетоны на синтетических и углеродных [68]. Стеклофибробетоны, имея по сравнению с бетонами на стальной фибре дополнительное преимущество (стойкость в коррозионных средах), получили меньшее практическое применение, поскольку мало стойки к щелочной среде цементного бетона. В

зарубежной практике для изготовления стеклофибробетона используется, как правило, щелочестойкое стекловолокно [69].

В 2001-2002г было налажено производство из стеклофибробетона и применено на объектах Московского строительства элементы несъемной опалубки, карнизные блоки эстакад, лотки водоотводов, плиты перекрытий каналов, элементы мостов и путепроводов и другие элементы. Однако, абсолютные объемы производства были невелики и носили опытный характер, т.к. не имели методики обоснованного подтверждения нормативных и расчетных характеристик и свойств стеклофибробетона [59].

Использование минеральных волокон для дисперсного армирования цементного камня ограничено в основном из-за их низкой стойкости к щелочной среде твердеющего цемента. Успешное использование этого материала невозможно без изучения процессов взаимодействия цементный камень - минеральное волокно [62].

В последние годы в технической литературе, а также периодической печати США, Европы, Японии и других стран опубликованы работы по использованию минерального волокна, в том числе и базальтового, для армирования бетонных конструкций, в которых отмечается высокая эффективность этого вида дисперсной арматуры [72]. Вместе с тем нет единого мнения по вопросам устойчивости системы «цементный камень - минеральное волокно» во времени.

Исследования группы ученых во главе с Рабиновичем Ф.Н. обнаружили высокую степень разрушения минерального волокна в растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . К примеру, алюмоборсиликатномоноволокно выдержанное в течение 12 месяцев в насыщенном растворе извести потеряло по их данным 72% своей исходной прочности. Однако исследователи отмечают высокую стойкость базальтового волокна, прочность которого после выдержки в аналогичных условиях уменьшилась лишь на 26-32% [62, 63]. Авторы также отмечают

тенденцию к затуханию реакции базальтовых волокон с СаО во времени. Наиболее интенсивно процессы выщелачивания наблюдаются в течение первых трех месяцев.

Пащенко А.А. с соавторами [48] утверждают о более высокой стойкости базальтовых волокон в агрессивных средах цементного камня и насыщенного раствора извести. Так, после трехлетних испытаний базальтового волокна прочность его уменьшилась лишь на 12-15%.

В связи с вышеизложенными следует более подробно остановиться и на развитии технологии фибробетонов.

## **1.2. Современное состояние развития технологии фибробетонов**

Все существующие фибробетоны можно классифицировать по видам волокон, которые применяются при их армировании [13, 68, 69]:

- Сталефибробетоны - армирование производится стальной фиброй из проволоки, канатов, слябов, листа;
- Стеклофибробетон - армирование производится фиброй из алюмо- боросиликатных, цирконийсодержащих, кварцевых и др. стекол;
- Базальтофибробетон - армирование производится отрезками базальтового волокна и непрерывными нитями из базальта;
- Фибробетоны с применением синтетических волокон - армирование производится нейлоновыми, полиэтиленовыми, полипропиленовыми и др. волокнами;
- Асбестоцемент - армирование производится короткими (0,5-4 мм) волокнами хризотилового асбеста.

Сравнительные характеристики всех существующих видов дисперсной арматуры представлены в табл. 1.2.

В табл. 1.2. приведены усредненные показатели различных видов волокон. Из приведенного перечня фибр наиболее эффективными для дисперсного армирования бетона с целью значительного увеличения его прочности могут считаться стеклянные, базальтовые, стальные и углеродные волокна.

Таблица 1.2

Технические характеристики фибр

Волокно	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Геометрические характеристики, L x d, мм
Полиэтиленовое	0,95	0,7	1,4-4,2	10	5-30 x 0,005-0,015
Акриловое	1,1	0,21-0,42	2-4	25-45	5-30 x до0,02
Асбестовое	2,6	0,91-3,1	68	0,6	0,1-10 x 0,001- 0,05
Стеклянное	2,6	1,05-3,25	70-80	1,5-3,5	5-50 x 0,005-0,05
Базальтовое	2,65	1,9-3,9	90-130	1,2-3,2	5-50 x 0,005-0,05
Стальное	7,8	0,8-3,1	200	3,5-4,0	5-50 x 0,1-2
Углеродное	2,0	2	245	1	5-30 x 0,005-0,05

При решении вопросов дисперсного армирования бетонных материалов необходимо учитывать, что не все искусственные волокна способны противостоять воздействиям среды гидратирующихся цементов [30]. Стеклянные волокна обычного состава подвергаются интенсивной коррозии в твердеющем бетоне на портландцементе [69]. При твердении цементного камня образуется агрессивная среда, которая разрушает

поверхность волокна, образуя при этом раковины. Однако это может влиять не только отрицательно на прочность материала в целом. Вводя дополнительное состав фибробетона пуццолановые добавки возможно регулировать степень взаимодействия волокна с выделяемой при гидратации портландцемента известью.

Из ряда минеральных волокон, при оценке их по стойкости в щелочной среде, выделяется базальтовая фибра. По некоторым данным прочность его

при использовании в цементных бетонах не изменяется в течение всего срока эксплуатации [16].

Базальтофибробетон по сравнению со сталефибробетоном, при условии разработки оптимальных способов распределения волокна в матрице и разработке самой матрицы, сможет обладать более высокой прочностью и деформативностью, т.к. армирующее его базальтовое волокно обеспечивает более высокую степень дисперсности армирования цементного камня и само базальтовое волокно обладает более высокой прочностью чем стальная фибра, которая составляет 1,9 - 3,9 ГПа. Кроме того, базальтофибробетон сможет переносить большие упругие деформации потому, что базальтовое волокно при растяжении пластических деформаций практически не имеет, а по модулю упругости превосходит бетон более чем в 3 раза. Плотность базальтовых волокон при прочих сопоставимых характеристиках со стальным волокном, в 3 раза меньше. Это облегчает конструкции из базальтофибробетона, уменьшает общий вес зданий и расходы на их возведение в целом. Благодаря толщине волокон 10- 12мкм, что меньше минимально возможного диаметра стального волокна на порядок, поверхность сцепления с цементной матрицей может достигать до 100000 м<sup>2</sup>/кг, в зависимости от дозировки волокна в цементной системе.

При этом ни одна из модификаций известных волокон не обладает такой мощной исходной сырьевой базой [29].

Влияние базальтовых волокон на свойства бетона зависит от их длины и отношения длины к диаметру. Теоретически более длинные волокна и с большим отношением длины к диаметру лучше, чем более короткие. Чем больше длина фибр, тем больше волокно оказывает влияние на прочностные показатели бетона в целом. Однако длинные волокна распределить и уложить более трудно, они хуже распределяются в бетоне. Наиболее эффективной длиной минерального волокна при дисперсном армировании бетона является 8-15мм [34], при этом должно соблюдаться условие, что длина волокна должна превосходить двойной диаметр наиболее крупного заполнителя.

До настоящего времени применение базальтовых волокон в строительных изделиях сдерживалось рядом причин. В частности, отсутствует нормативная база по проектированию, расчету, технологиям производства строительных конструкций из товарных бетонов с использованием базальтового волокна. Обширного внедрения базальтофибробетонов нет по причине отсутствия нормативных документов, устанавливающих требования к самому базальтовому волокну, как к дисперсной арматуре бетонов. Именно по этой причине данные о стойкости волокон к щелочной среде разнятся. Существуют две технологии получения базальтового волокна: методом выдувания из расплава и методом вытягивания волокон из расплава через фильеры. Первый метод используется для получения теплоизоляционных материалов. Получаемый материал имеет большое количество посторонних включений в виде корольков, волокна имеют большой разброс в геометрических размерах как для единичного волокна, так и для общей массы фибры в целом.

Второй метод позволяет регулировать геометрические характеристики волокон, получать фибру одинаковой структуры и механических свойств. Этот метод получения базальтового волокна наиболее подходит для дисперсного армирования бетонов [63].

Несмотря на все многообразие видов используемых в строительной индустрии фибр, выбрать какой-то единый тип, который удовлетворял бы всем требованиям, предъявляемым к современным строительным материалам, не представляется возможным. В нашем случае интерес представляют фибробетоны, армируемые высокопрочными волокнами, с высоким по отношению к бетону модулем упругости. Каждый из указанных видов фибробетонов имеет характерные достоинства и недостатки.

В последнее время предложена следующая классификация бетонов по прочности : 1- рядовые бетоны (с прочностью до 40 МПа) имеющие самый массовый спрос и потребление на строительном рынке; 2 - высокопрочные бетоны (40-80 МПа), широко применяемые в строительстве высотных зданий и сооружений; 3 - особо высокопрочные бетоны (80-120 МПа) для конструкций зданий и сооружений повышенной ответственности и большого ресурса эксплуатации; 4 - сверхвысокопрочные бетоны (более 120МПа) уникального назначения [22].

Так называемые сверхвысокопрочные бетоны (с прочностью на сжатие более 120 МПа) ограничены в применении из-за ряда причин, основными из которых можно выделить следующие [7]:

- очень тщательный подбор заполнителей имеющих собственную высокую прочность (таких как гранитная крошка). Основным принципом здесь выступает улучшение однородности структуры бетона за счет исключения крупного заполнителя;

- повышение плотности укладываемой смеси за счет оптимизации гранулометрического состава заполнителей и приложения давления до и во время схватывания и твердения бетона;

- улучшение микроструктуры бетона за счет специальных режимов тепловой или автоклавной обработки после схватывания;

- большое количество активных пуццолановых наполнителей (до 25-35% от массы цемента) и применение повышенного расхода гиперпластификаторов (3-5% от массы цемента);

- применение высокомарочных цементов с активностью не менее 80-100 МПа с соотношением вяжущее/заполнитель 1:1, 1:1,5.

Такой подход к производству бетонов дает возможность получения высокопрочных бетонов с прочностью на сжатие в марочном возрасте до 800МПа. Однако применение его в изготовлении конструкций должно быть экономически обосновано, поскольку стоимость такого бетона превосходит стоимость металлоконструкций на несколько порядков, а применение в построечных условиях практически исключено.

Однако применение фибрового армирования базальтовым волокном высокой дисперсности позволит, по нашему мнению, получить составы сверхвысокопрочных бетонов на рядовых заполнителях и цементах, за счет высокой гомогенизации всех компонентов смеси.

Наиболее распространенным вяжущим для получения высокопрочных бетонов является портландцемент. Свойства портландцементов подробно исследованы и описаны в литературе. Среда гидратирующихся портландцементов является достаточно агрессивной по отношению ко всем видам минеральных волокон. Однако данный фактор может оказывать как отрицательное, так и положительное влияние на обеспечение прочности сцепления в контактной зоне между цементной матрицей и армирующими волокнами [62,63].

Основным компонентом жидкой фазы твердеющего портландцемента, влияющим на армирующие волокна, является гидроксид кальция [27], активно взаимодействующий с компонентами минерального волокна, в первую очередь, с кремнеземом. В результате воздействия щелочесодержащей жидкой фазы твердеющего цемента происходит коррозионное разрушение минеральных волокон вследствие выщелачивания и разрушения их кремнекислородно-го каркаса при длительном контакте со средой. Здесь также, следует отметить, что снижение содержания алита и повышение количества белитовой фазы в портландцементе уменьшает, как правило, интенсивность агрессивного влияния среды гидратации цемента по отношению к стеклянным волокнам [69].

Однако наилучшие результаты по прочности на сжатие показывают цементы с повышенным содержанием C3S (не менее 50%) [7]. Таким образом, для получения высокой прочности необходимы цементы с высоким содержанием алитовой фазы, что может отрицательно сказаться на стойкости базальтового волокна во времени. Эта проблема может решиться при помощи определенного количества активных пуццолановых наполнителей, связывающих выделяющийся в процессе гидратации гидроксид кальция. Выше отмечалось, что одним из условий получения сверхвысокопрочных бетонов является отказ от крупного заполнителя. А мелкий заполнитель должен ограничиваться фракциями не крупнее 1 мм [8]. При этом должен осуществляться гранулометрический подбор заполнителей, обеспечивающий максимальную упаковку всех компонентов зернистого каркаса бетонной смеси. Такой состав заполнителя более благоприятствует равномерному распределению волокна, чем крупнозернистая смесь. При армировании бетона минеральным волокном рекомендуется использовать заполнитель с крупностью до 2,5 мм [6]. Одним из условий для получения бетонов высокой прочности является минимальная пустотность и однородность его структуры, достигаемая исключением грубой зернистости и подбором

соответствующих фракций. Также качество фибробетона зависит от химического и минералогического состава заполнителей, их структуры, формы зёрен, плотности, твёрдости, прочности и других их свойств [16]. Опыт производства высококачественного бетона в США и Европе показывает, что максимальная крупность заполнителя не должна превышать 1-2 мм. Такой бетон по сути становится тонкозернистым, с более гомогенизированной структурой [6]. Одним из наиболее перспективных и эффективных направлений совершенствования структуры цементных композиций и бетонов на их основе является широкое использование различных органических и неорганических добавок [45]. Вводимые в незначительных количествах модифицирующие добавки оказывают влияние на процессы гидратации и кристаллизации, морфологию новообразований и, в целом, на структуру затвердевшего цементного камня, изменяя, тем самым, свойства бетона - прочность, пористость, водонепроницаемость, усадку, трещиностойкость и т.д. [53]. Номенклатура применяемых добавок очень обширна. Актуальным направлением в получении высококачественных цементных композиций, отличающихся более широким спектром функциональных возможностей, является использование комплексных добавок, сочетающих в себе свойства индивидуальных добавок различного функционального назначения [32]. Многокомпонентность комплексных добавок и, как следствие, многокомпонентность бетонной смеси позволяет эффективно управлять процессами структурообразования на всех этапах технологии приготовления бетона и получать бетон с различными эксплуатационными свойствами. При этом высокие технологические свойства бетона наряду с многокомпонентностью состава обеспечиваются и высокими функциональными свойствами самих компонентов [2]. Основным компонентом таких бетонов являются тонкодисперсные добавки - наполнители с высокими пуццоланическими свойствами [12]. К ним относятся, прежде всего, микрокремнеземы (microsilica, silicaatraub, silica -

dumpf), активные высокодисперсные золы, не содержащие несгоревших остатков, дегидратированные каолины и др. Наиболее реакционно-активными из них считаются микрокремнеземы, способные связывать гидролизную известь в процессе твердения цемента в низкоосновные гидро силикаты кальция и значительно повышать прочность и долговечность бетона. В настоящее время номенклатура тонкодисперсных наполнителей высокопрочных бетонов значительно расширена. В их числе предложено использовать измельченные отходы металлургической и энергетической промышленности, кварцевые пески, известняки и доломиты, отходы от производства бетона, имеющиеся практически во всех регионах страны [44]. Особенно эффективно использование таких добавок в комплексе с суперпластификаторами и армирующими элементами [71]. Понижение водосодержания бетонных смесей до уровня нормальной густоты цементного теста требует применения высокоэффективных разжижителей. Не случайно основные области применения бетонов с суперпластификаторами - это высокопрочные бетоны. При производстве высокопрочных бетонов за рубежом предъявляются особо жесткие требования к суперпластификаторам, которые должны обладать не только высокой реологической активностью, но и минимальным воздействием на гидратационную активность цементов в начальной фазе твердения [75]. В качестве суперпластификаторов наиболее широко применяются соединения следующих видов: модифицированные лигносульфонаты, сульфированные меламинформальдегидные смолы, продукты конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида. В Узбекистане использованию фибробетона в строительстве пока не уделяется достаточного внимания, из-за не достаточной изученности его свойств и технологии получения, отсутствием сведений о наличии сырьевой базы волокнистых наполнителей и недостаточной обоснованности эффективных областей его использования. Учитывая то, что в Узбекистане (в городе Навои) освоено производство базальтового волокна, а также то, что

строительная отрасль Узбекистана нуждается в новых современных эффективных конструкционных строительных материалах, считаем целесообразным проведение комплекса НИР по изучению свойств базальтофибробетона на основе местного сырья и материалов.

### **1.3. Цель и задачи исследований**

Настоящая магистерская диссертация направлена на обоснование возможности использования местного базальтового волокна (производство освоено в г.Навои) в качестве дисперсно-волокнистого наполнителя для производства базальтофибробетона, исследование его строительно-технических свойств и уточнение областей эффективного его использования в строительном производстве.

Поэтому перед настоящей научно-исследовательской работой была поставлена задача проведения комплекса экспериментально-теоретических исследований по изучению свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с использованием в качестве дисперсно-волокнистого наполнителя Навоийского базальтового волокна, уточнению механизма и роли влияния этого наполнителя на свойства цементных систем, оптимизации составов базальтофибробетона и определению рациональных областей его применения в строительном производстве с целью достижения максимальной эффективности от внедрения инновационной идеи.

**Целью настоящей диссертационной работы** является проведение комплекса экспериментально-теоретических исследований по обоснованию возможности использования местного базальтового волокна (производство освоено в городе Навои) в качестве дисперсно-волокнистого наполнителя для получения базальтофибробетона, изучению свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с использованием базальтового дисперсно-

волокнуистого наполнителя, оптимизации состава базальтофибробетона, а также уточнению рациональных областей применения разрабнного базальтофибробетона в строительной отрасли Узбекистана.

**В частности, предстоит решить следующие задачи:**

1. Определение свойств Навоийского базальтового волокна как дисперсно-волокнуистого наполнителя для базальтофибробетона.
2. Выбор методики экспериментальных исследований свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с применением базальтового дисперсно-волокнуистого наполнителя.
3. Выполнение экспериментальных исследований по определению основных свойств цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона с базальтовым дисперсно-волокнуистым наполнителем.
4. Подбор оптимального состава базальтофибробетона с использованием метода математического планирования экспериментов.
5. Разработка практических рекомендаций по освоению технологии базальтофибробетона на основе местного базальтового волокна .

**Научная новизна** работы состоит в следующем:

1. На основании проведенного комплекса экспериментально-теоретических исследований цементного вяжущего, бетонной смеси и бетона установлены закономерности влияния дисперсно-волокнуистого наполнителя-Навоийского базальтового волокна на свойства цементных материалов.
2. На основании разработанных математических моделей выявлены зависимости изменяя прочностных свойств базальтофибробетона от рецептурно - технологических параметров.
3. Подобран оптимальный состав базальтофибробетона с использованием Навийского базальтового волокна .

**Практическое значение** проведенных исследований заключается в том, что в результате обобщения экспериментальных и теоретических исследований разработаны практические предложения и рекомендации по

получению базальтофибробетона на основе местного дисперсно-волокнутого наполнителя- Навийского базальтового волокна.

## ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ВЫБОР МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1. Характеристика исходных материалов

При выполнении экспериментальных исследований в качестве вяжущего был использован портландцемент марки М400 Ахангаранского цементного комбината. Химический состав клинкера Ахангаранского цементного комбината характеризовался содержанием следующих окислов: СаО- 65,79%, SiO<sub>2</sub> - 22,12%, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 4,54%, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - 4,17%, SO<sub>3</sub> -0,64%, MgO - 1,71%, Na<sub>2</sub>O - 0,23%, K<sub>2</sub>O - 0,38%, п.п.п.- 0,20%.

Минералогический состав портландцементного клинкера характеризовался содержанием следующих минералов: C<sub>3</sub>S- 57,5%, C<sub>2</sub>S - 17,8%, C<sub>3</sub>A - 4,7%, C<sub>4</sub>AF - 12,5%.

Результаты исследования физических и физико-механических свойств вяжущего представлены в табл. 2.1 и 2.2.

Таблица 2.1

Физические свойства портландцемента

Вид цемента	Средняя плотность г\см <sup>3</sup>	Истинная плотность г\см <sup>3</sup>	Тонкость помола		Нормальная густота
			Удельная поверхность м <sup>2</sup> \кг	Остаток на сите 0,08, %	
Портландцемент Ахангаранский М 400	1,21	3,20	300	8,5	25,5



кой ГРЭС	49,7	19,1	10,5	11,5	3,6	1,4	-	0,9	1,4	0,2	1,2
----------	------	------	------	------	-----	-----	---	-----	-----	-----	-----

Таблица 2.4.

Физические характеристики золы

Вид золы	Истинная плотность, г\см <sup>3</sup>	Объёмная масса, кг\м <sup>3</sup>	Удельная поверхность, см <sup>2</sup> \г	Водопотребность, %	Активность поглощению извести, мг\ч	Модуль активности	Модуль основности
Зола-унос Новоангреской ГРЭС	2,12	1150	3000	54	25	0,38	0,22

Таблица 2.5.

Фракционный состав золы

Вид золы	Содержание, % по массе							
	0-5	5-10	10-20	20-30	30-40	40-60	60-80	8
Зола-унос Новоангреской ГРЭС	1,9	3,5	11,3	20,4	32,5	18,6	8,1	3,7

По модулю активности  $M_a = Al_2O_3/SiO_3$  зола-унос классифицируется как низкоактивная.

По модулю основности  $M_o = (CaO + MgO) / (SiO_2 + Al_2O_3)$  зола-унос относится по классификации А.В.Волженского к сверхкислым.

В качестве мелкого заполнителя использовали строительный песок Куйлюкского карьера с модулем крупности  $M_{кр} = 2,65$  согласно ГОСТ 8736-85.

Фракционный состав песка Куйлюкского карьера приведен в табл.2.6.

Таблица 2.6.

Физические свойства песка

Гранулометрический состав				Модуль крупности	Средняя насыпная плотность г\см <sup>3</sup>	Содержание глинистых и пылевидных включений, %	Содержание органических примесей
Размер	Остаток на сети, г	Частичный остаток, %	Полный остаток, %				
2,5	84	8,4	8,4	2,65	1,45	1,1	Жидкость оставшаяся над песком, светлее эталона
1,25	115	11,5	19,9				
0,63	368	36,8	56,7				
0,315	245	24,5	81,2				
0,14	151	15,1	99,3				
Прошло сквозь сито							
0,14	7	0,7	100,0				

Для контроля активности цемента использовался песок монофракционный стандартный по ГОСТ 6139-91.

Для определения удельной поверхности песка в использовали формулу Ладинского С.А.

$$S_z = \frac{16.5 R_\phi}{1000} (a + 2b + 4c + 8d + 16e + 32f),$$

где  $R_\phi$  - коэффициент учитывающий форму зерен (1,5 ... 2,5);

a, b, c, d, e, f - частные остатки на ситах с размером отверстий 2,5, 1,25, 0,63, 0,315, 0,14 и прошедшее через 0,14 мм.

В качестве пластифицирующей добавки был использован:

-суперпластификатор С-3 (ТУ 6-36-0204229-625-90\*) производства Новомосковского завода ООО «Полипласт», который представляет собой неслеживающийся порошок коричневого цвета, легкорастворимый в воде. С-3 относится к категории анионоактивных ПАВ и является смесью олигомерных и полимерных соединений, образующихся при конденсации сульфокислот нафталина с формальдегидом и нейтрализации щелочью (NaOH) и технических лигносульфонатов, непрореагировавшей соли β- нафталинсульфокислоты и сульфата натрия. В соответствии с ТУ 6-36-0204229-625-90\* в С-3 содержание активного вещества в пересчете на сухой продукт не менее 69 %, содержание золы не более 38 %, рН (2,5 %-ного водного раствора) 7-9, содержание воды не более 10 %.

В качестве дисперсно-волокнутого наполнителя использовался

базальтовое моноволокно диаметром 10мкм, полученное из базальтового ровинга (комплексной нити из непрерывного базальтового волокна) производства ЧПП «Тризол-Н» (г. Навои);

Требования предъявляемые к суперпластификатору С-3 приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7.

Требования к суперпластификатору С-3

Наименование показателей	Требования
Внешний вид	Жидкость коричневого цвета. Допускается осадок
Содержание активного вещества в пересчете на сухой продукт, % не менее	69
Содержание воды, % не более	68
Содержание золы в пересчете на сухой продукт, % не более	38
рН 2,5 %-го водного раствора	7-9

Химический состав используемых волокон представлен в табл.2.8, технические характеристики представлены в табл.2.9.

Таблица 2.8.

Химический состав базальтовых волокон

Волокно	Содержание окислов, %						
	S SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +TiO <sub>2</sub>	F Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C CaO	M MgO	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	П .п.п.
Волокно из рубленного базальтового ровинга	5 0,29	1 6,22	1 4,89	1 3,90	1 .88	2 .04	-

Таблица 2.9.

Технические характеристики базальтового волокна

Волокно	Диаметр волокна, мкм	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Прочность на растяжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение при разрыве, %	Температура эксплуатации, °С
Волокно из рубленного базальтового ровинга	1 10±0,5	2, 80	3,5- 3,6	9 1-110	3, 0-3,3	от -200 до +700

В экспериментах также использовалась водопроводная питьевая вода, удовлетворяющая требованиям ГОСТ 23732.

## **2.2. Методы исследований, приборы и оборудование**

Удельная поверхность наполнителей определялась на приборе ПСХ-12. Действие прибора основано на измерении удельной поверхности порошковых материалов методом Козеини-Кармана - по воздухопроницаемости и пористости уплотненного слоя порошка и соответствующие ей среднемассовые размеры частиц [3].

Активность наполнителей определяли по поглощению СаО из насыщенного раствора извести с рН=12,15 [45]. Добавки затворялись насыщенным раствором СаО. Через двое суток после смешивания из раствора с добавкой отбирали 50 мл раствора и титровали. В качестве титра использовали 0,05Н раствор соляной кислоты. Затем один раз в сутки колбу с раствором встряхивали, и через каждые двое суток титровали. После каждого титрования в колбу добавляли 50мл нового насыщенного раствора извести. Таким образом раствор титровали 15 раз в течении 30 суток. Общее количество СаО, поглощаемое 1г минеральной добавки определяли путем суммирования всех 15 замеров.

Пластифицирующий эффект и водоредуцирующее действие оценивалось по методике, разработанной на кафедре ТБКиВПензенского ГУ АС [73]. Эта методика позволяет существенно сократить расход материалов. Для определения этого использовали видоизмененный вискозиметр Суттарда, который представляет собой стальной цилиндр из нержавеющей стали с внутренним диаметром 10 мм и высотой 40 мм. Изменение водопотребности и подвижности оценивалось по величине расплыва на границе гравитацион-

ной растекаемости. Предельное напряжение сдвига при этом определялось по формуле:

$$\tau_0 = hd^2\rho/kD^2$$

где  $\tau_0$  - предельное напряжение сдвига суспензии, Па;

$h$  и  $d$  - соответственно высота и диаметр вискозиметра, м;

$\rho$  - плотность суспензии, кг/м<sup>3</sup> ;

$k$  - коэффициент, учитывающий перераспределение напряжений в вязкопластичных телах, равный 2;

$D$  - диаметр расплыва суспензии, м.

Для вискозиметра с указанными размерами расплыв на границе гравитационной растекаемости равен 22...24 мм, что соответствует  $\tau_0 = 10-30$  Па. Водоредуцирующее действие суперпластификатора определяли из выражения:

$$\Delta V = \frac{(V/C)_n - (V/C)_п}{(V/C)_н} \times 100\%$$

где  $(V/C)_п$  и  $(V/C)_н$  — водоцементное отношение пластифицированных и непластифицированных систем.

Определение рН-среды (активность ионов водорода) гидратирующегося цемента с модификаторами и без них осуществляли потенциометрическим методом на милливольтметре рН-213 производства HANNA Instruments.

Для испытаний в качестве проб использовали: порошок цементного камня, измельченного в фарфоровой ступке до момента, когда вся навеска проходила через сито 008. С целью исключения влияния процесса карбони-

зации и загрязнения от стенок и дна формы пробу извлекали из середины образца.

Навеску цементного камня (цементного теста) в количестве 10 г помещали в коническую колбу, и тщательно перемешивали в течение 20-30 с. Полученную цементную суспензию отфильтровывали, и раствор фильтрата переливали в стеклянный стаканчик. Измерения проводили, опуская в стеклянный стаканчик с исследуемым раствором два электрода - электрод измерения (индикаторный), потенциал которого зависит от концентрации определяемых ионов в растворе, и электрод сравнения (стандартный), относительно которого измеряют потенциал электрода измерения. Потенциал электрода сравнения остается постоянным при изменении концентрации определяемых ионов. После каждого измерения электроды осушали фильтровальной бумагой и промывали дистиллированной водой.

Для определения реологических свойств цементных суспензий армированных базальтовым волокном в вязкопластичном состоянии в работе использовали ротационный вискозиметр РВ-8 конструкции Волоровича М.П., основными рабочими органами в котором являются два латунных коаксиальных цилиндра. Между ними помещали испытуемую суспензию. Вращение внутреннего цилиндра с помощью грузов относительно наружного позволяет установить зависимость вязкости текучих смесей от числа оборотов в секунду по формуле:

$$\eta = kx(P - P_0)/N$$

Где  $P$  - сумма грузов, вращающих внутренний цилиндр, г;

$P_0$  - трение подшипников, соответствующее грузу массой  
1-2 г;

$N$  - число оборотов цилиндра в секунду;

$k$  - константа прибора.

Вискозиметр позволяет также оценить предельное напряжение сдвига -  $\tau$ , возникающее в испытуемой жидкости в результате вращения внутреннего цилиндра:

$$\tau = k_1 \times (P_1 - P_0)$$

где  $P_1$  - минимальный груз, при котором начинается при постепенном увеличении нагрузки вращение внутреннего цилиндра, г;

Технологические свойства тонкозернистого бетона при разном водоцементном отношении оценивали по изменению её подвижности. Подвижность оценивали по расплыву конуса (ГОСТ 310.4-81), по расплыву на вискозиметре Суттарда.

Изменение подвижности тонкозернистого бетона оценивали следующим образом:

- по расплыву конуса:

$$PK = d_1/d_2$$

где  $d_1$ , и  $d_2$ - диаметры, см, расплыва конуса растворной смеси с разным водоцементным отношением.

по расплыву на вискозиметре Суттарда:

$$PC = D_1/D_2$$

где  $D_1$  и  $D_2$  - диаметры расплыва, см, растворной смеси с разным водоцементным отношением.

Изменение линейных деформаций определяли на образцах-балочках 40x40x160 мм, изготовленных в зависимости от цели эксперимента из цементного теста нормальной густоты или из тонкозернистых базальтофибро- бетонных смесей, твердевших в воздушно-влажных, нормально-влажностных или водных условиях. При этом руководствовались методиками ГОСТ 11052 или ТУ 5734-072-46854090-98, согласно которым

измерение деформаций проводили с помощью индикатора часового типа с точностью 0,01 мм. В ряде случаев изменение деформаций фиксировали штангенциркулем с ценой деления 0,1 мм.

Плотность, определяли в соответствии с методиками ГОСТ 12730.0-78 — ГОСТ 12730.4-78.

Прочность на сжатие, растяжение при изгибе и прочность на растяжение при раскалывании определяли на прессах Р-5, МИИ-100, УММ-10, МС-500в

соответствии с методиками ГОСТ 310.4-81, ГОСТ 10180-90 и ГОСТ 1810586.

Прочность на сжатие и на растяжение при раскалывании цементного камня, тонкозернистого бетона и базальтофибробетона определяли на образцах размерами 2х2х2см.

Прочность на растяжение при изгибе цементного камня, тонкозернистого бетона и базальтофибробетона определяли на образцах 2х2х8см.

В каждой серии испытаний количество образцов принималось не менее трех.

Для объективной оценки точности измеряемых случайных величин использовалась статистическая обработка результатов эксперимента. Обработку экспериментальных данных производили при помощи программы Microsoft Excel. Фактические данные физико-механических испытаний подвергались статистической обработке с вычислением среднеарифметических значений результатов испытаний, среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации и определением количества образцов, необходимых для получения результатов с заданной степенью точности. Для обеспечения достоверности результатов эксперимента минимальное количество образцов в каждой серии испытаний принято не менее трех, что удовлетворяет

требованиям ГОСТ 10180-90 "Методы определения прочности по контрольным образцам".

Методика обработки экспериментальных данных и математического моделирования прочности бетона принята согласно рекомендациям изложенным в [2].

Исследование влияния различных факторов на технологические свойства бетонной смеси и физико-технические свойства бетона производили по результатам испытаний серий образцов.

Для каждого вида измерений, в зависимости от его погрешности, определялось потребное их количество. При этом среднее значение  $\bar{Y}_{u/v}$ , полученное после измерений, рассчитывали по формуле [57]:

$$\bar{Y} = \frac{1}{m} \sum_{w=1}^m \bar{Y}_{uw} \quad (2.2)$$

Дисперсию, характеризующую рассеяние в серии измерений определяли по формуле [60]:

$$S^2_{u/w} = \frac{1}{m-1} * \sum_{w=1}^m \left( \bar{Y}_{u/w} - Y_{u/w} \right)^2 \quad (2.3)$$

Оценка аномальности отдельных результатов испытаний на прочность ( $R_i$ ) осуществлялась сравнением величины  $T_i$  с критическим значением  $T_k$  [14], где:

$$T_i = \frac{|R_i - \bar{R}|}{S_{u/w}} \quad (2.4)$$

Если величина  $T_i$  превышала  $T_k$ , то результат испытания исключался из последующих расчетов.

В качестве характеристик фактической однородности в серии испытаний использовали среднее квадратичное отклонение  $S_{u/v}$  и коэффициент вариации  $V$ , которые определялись по формулам [12]:

$$S_{u/w} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{w=1}^m (\bar{Y}_{u/w} - Y_{u/w})^2} \quad (2.5)$$

$$V = \frac{S_{u/w}}{\bar{Y}_{u/w}} 100\% \quad (2.6)$$

Воспроизводимость опытов оценивали после серии из  $p$  дублирующих параллельных опытов с  $m$  измерителями в каждом.

Среднее по воспроизводимости  $\bar{Y}_{u/v}$  рассчитывали по формулам:

$$\bar{Y}_{u/vw} = \frac{1}{mn} \sum_{v=1}^n \sum_{w=1}^m Y_{uvw} ; \quad (2.7)$$

$$S^2_{u/v} = \frac{1}{n-1} \sum_{v=1}^n (\bar{Y}_{u/vw} - \bar{Y}_{u/v})^2 \quad (2.8)$$

Оценка дисперсии воспроизводимости и проверка равнозначности полученных данных выполнена по критерию Кохрена для 50% точек, в которых производились повторные испытания.

Фактически значение критерия Кохрена ( $G$ ), определяемое по формуле:

$$G = (S^2_{uv/w})_{\max} / \sum_{v=1}^n S^2_{uv/w} \quad (2.9)$$

сравнивалось с теоретическим ( $G$ ).

Заключение о равнозначности измерений и испытаний выполнялось по правилу: если  $G < G_{\text{таб}}$ , то при заданном уровне значимости ( $\alpha=0,05$ ) гипотеза об однородности ряда дисперсий допускается как правдоподобная.

Математическое моделирование прочности бетона производили с целью оптимизации его состава. Для описания прочности бетона в любой точке области эксперимента использовали полиномальные модели второго порядка с тремя переменными факторами [57]:

$$Y(x) = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 + a_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (2.10)$$

где  $Y(x)$ -параметр оптимизации;

$x_1, x_2, x_3$ -переменные параметры;

$a_0, a_1, a_2, a_3, \dots, a_{23}, a_{123}$  - коэффициенты уравнения регрессии.

Для постановки эксперимента был выбран план ВЗ, отличающийся минимальным числом опытов, простотой вычисления коэффициентов уравнения и независимостью их определения и оценивания.

Схема организации экспериментов предусматривала проведение  $m=3$  дублирующих измерений параметра выхода в 3 точках факторного пространства.

При регрессионном анализе проверялись статические гипотезы, об однородности дисперсий проводились, по критерию Кохрена при числе степеней свободы  $f_1=m-1$  и  $f_2=N$ , а также уровнем значимости 2.

$$G = S^2 \max / \sum_{u=1}^n S_u^2 \quad (2.11)$$

$S^2 \max$  - максимальная из дисперсий;

$S_u^2$  - дисперсия в  $n$ -ной точке плана.

Рассчитанные значения  $G$  сравнивались с  $G_{кр}$  по таблицам для степени риска  $\alpha=0,05$ .

При проверке гипотезы о значимости коэффициентов регрессии использован  $t$ - критерий Стьюдента, взятый при вероятности 0,05 и числе степеней свободы  $f=(m-1)N$ .

Оценку каждого коэффициента регрессии производили по формуле:

$$(tS\{b\})_i = a_i / \sqrt{c_{ig}} \quad (2.12)$$

Расчеты коэффициентов уравнения регрессии и анализ полученной модели выполнен с использованием персонального компьютера «Pentium-4».

## **ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЦЕМЕНТНОГО ВЯЖУЩЕГО С БАЗАЛЬТОВЫМ ДИСПЕРСНО-ВОЛОКНИТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

### **3.1. Исследование химического взаимодействия базальтового наполнителя с продуктами гидратации цемента**

Возможность использования базальтового волокна в цементных системах во многом зависит от стойкости волокон к действию продуктов гидратации цемента. Ранее проведенные Канаевым С.Ф. [73] исследования показали, что стойкость базальтового волокна и базальтопластиковой арматуры превосходит аналоги из стекловолокна.

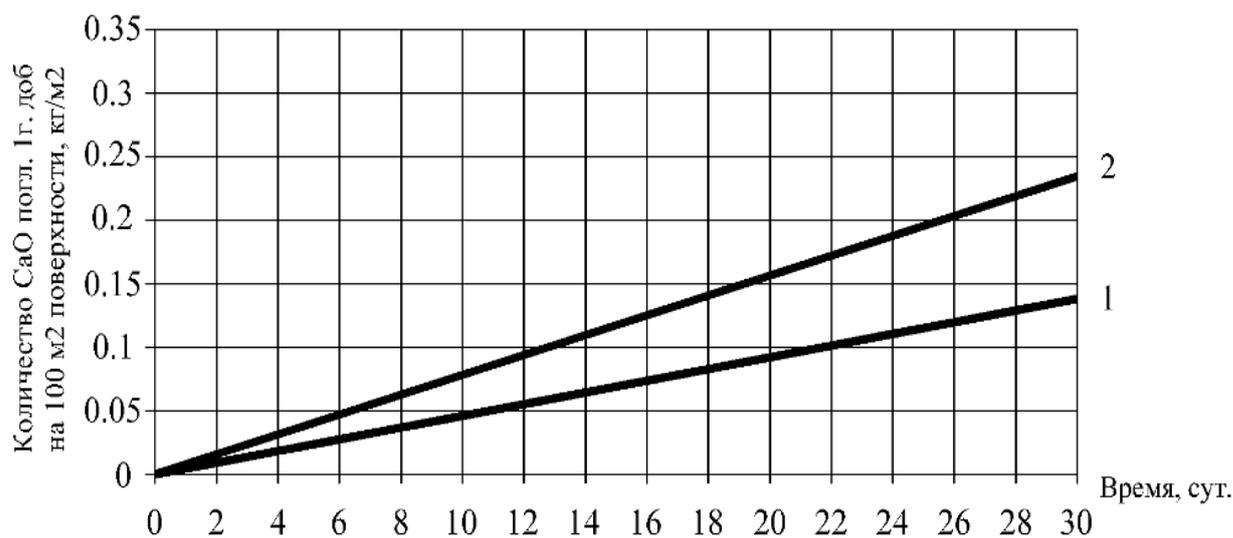
Исследования стойкости минеральных волокон в растворе  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  группой ученых во главе с Рабиновичем Ф.Н. говорят о достаточно высокой степени разрушения минерального волокна в агрессивной среде. К примеру алюмоборсиликатное моноволокно выдержанное в течение 12 месяцев в насыщенном растворе извести потеряло по их данным 72% своей исходной прочности. Однако, исследователи отмечают довольно высокую стойкость базальтового волокна, прочность которого после выдержки в аналогичных

условиях уменьшилась лишь на 26-32% [70]. Авторы также отмечают тенденцию к затуханию процессов реакции базальтовых волокон с СаО во времени. Наиболее интенсивно процессы выщелачивания наблюдаются в течение первых трех месяцев.

Группа авторов во главе с Пашенко А.А. в своих работах, также посвященных исследованиям стойкости минеральных волокон, утверждает о более высокой стойкости базальтовых волокон в агрессивных средах цементного камня и насыщенного раствора извести. Так, к примеру, после трехлетних испытаний базальтового волокна прочность его уменьшилась лишь на 12-15% [48].

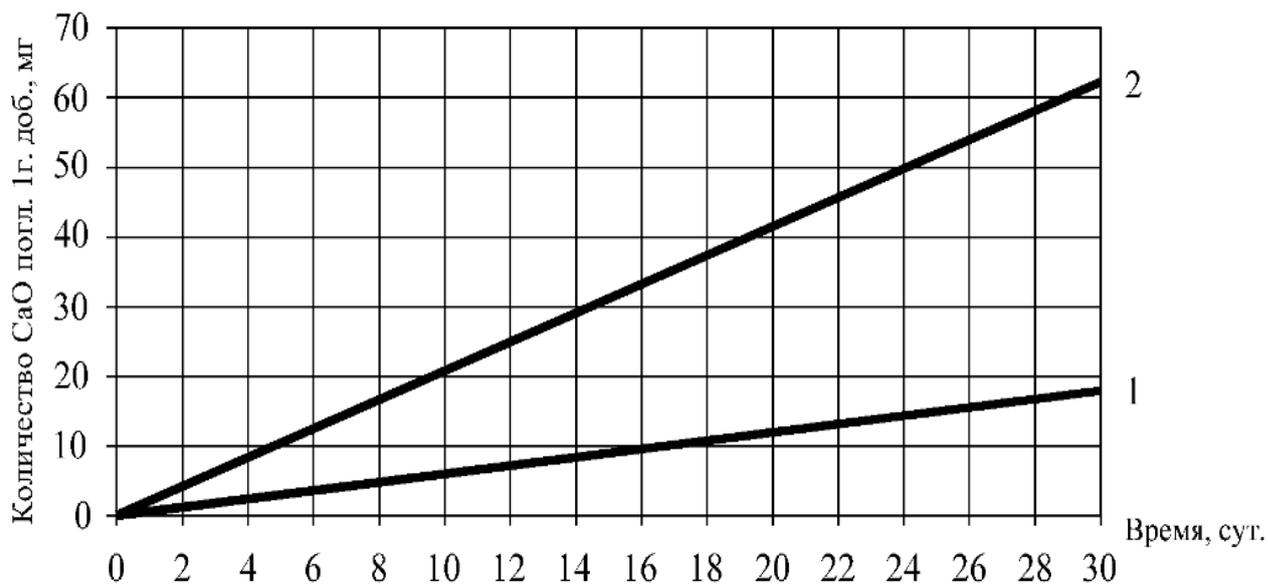
Оценка химической стойкости базальтового волокна производилась при, при кипячении в этом растворе Са(ОН)<sub>2</sub> в течение 4 часов [11].

Результаты исследования по поглощению СаО представлены на рис.3.1. и 3.2.



1. Непрерывное базальтовое волокно 2. Базальтовая порода

Рис.3.1. Активность базальтового волокна по отношению к СаО



1. Непрерывное БВ 2800см<sup>2</sup>/г 2. Базальтовая порода 3500см<sup>2</sup>/г

Рис.3.2. Активность базальтовых волокон по отношению к СаО, отнесенная к 100м<sup>2</sup> поверхности.

В связи с этим нами была проведена проверка устойчивости базальтового волокна в насыщенном растворе Са(ОН)г - основном компоненте жидкой фазы гидратирующегося цемента по поглощению СаО [74].

Как видно из Рис.3.1. наибольшей активностью по отношению к СаО обладает базальтовая порода, несмотря на то, что удельная поверхность порошка, полученного из базальтовой породы составляет  $\delta_{уд}=2500 \text{ см}^2/\text{г}$ . Это говорит о большей реакционной способности базальта по отношению к СаО в сравнении с кварцевым песком. Это подтверждается и при пересчете поглощения СаО на 100м<sup>2</sup> поверхности добавки. Поглощение СаО из насыщенного раствора извести базальтовым волокном составляет 0.18 кг/м<sup>2</sup>, что говорит о его химическом взаимодействии с продуктами гидратации портландцемента.

Таким образом, подтверждается, что базальтовое волокно вступает в реакцию с продуктами гидратации портландцемента. Однако

реакция протекает весьма ограниченно. По данным Боровских И.В. [75] в реакцию вступает не более 10-12% поверхности волокон, что незначительно уменьшает их прочность и не влияет на прочность всего фиброармированного композита в целом. Учитывая то, что в процессе гидратации цемента СаО образуется в начальные сроки твердения, представляется целесообразным путем введения минеральных наполнителей (в частности, золы – уноса Новоангенской ГРЭС ) регулировать степень взаимодействия щелочной среды с базальтовым волокном. Кроме того, по данным С.Ф. Ястржембского [73], интенсивность взаимодействия базальтового волокна с цементной матрицей имеет затухающий характер, поскольку на поверхности волокна образуется слой нерастворимых гидросиликатов, препятствующих развитию коррозии волокна.

### **3.2. Исследование влияния базальтового наполнителя на прочностные свойства цементного камня (базальтофиброцемента)**

При исследований влияния дисперсного армирования на свойства цементного камня и бетона, наибольший интерес вызывают физико-механические свойства. В данном разделе рассмотрены прочностные и деформативные свойства пластифицированного цементного камня, модифицированного наполнителем и армированного базальтовым волокном.

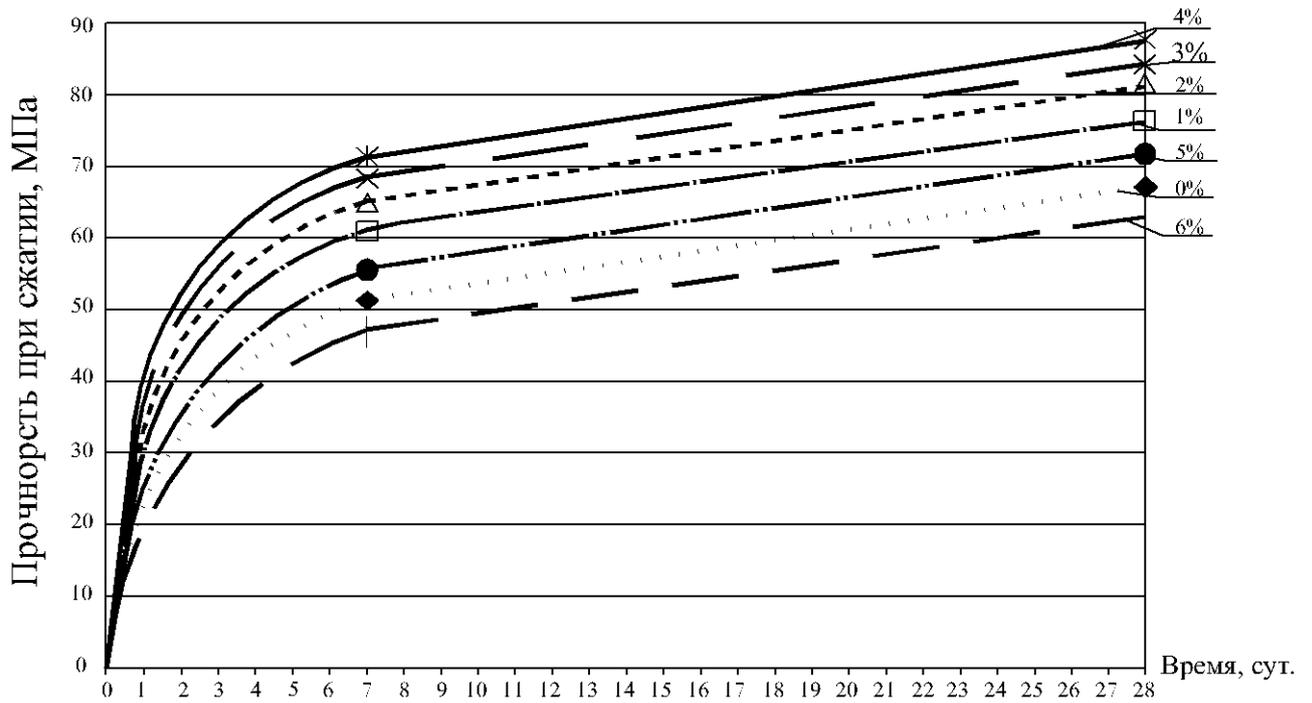


Рис. 3.3. Кинетика набора прочности цементного камня, армированного базальтовым волокном.  
(НГЦТ=const)

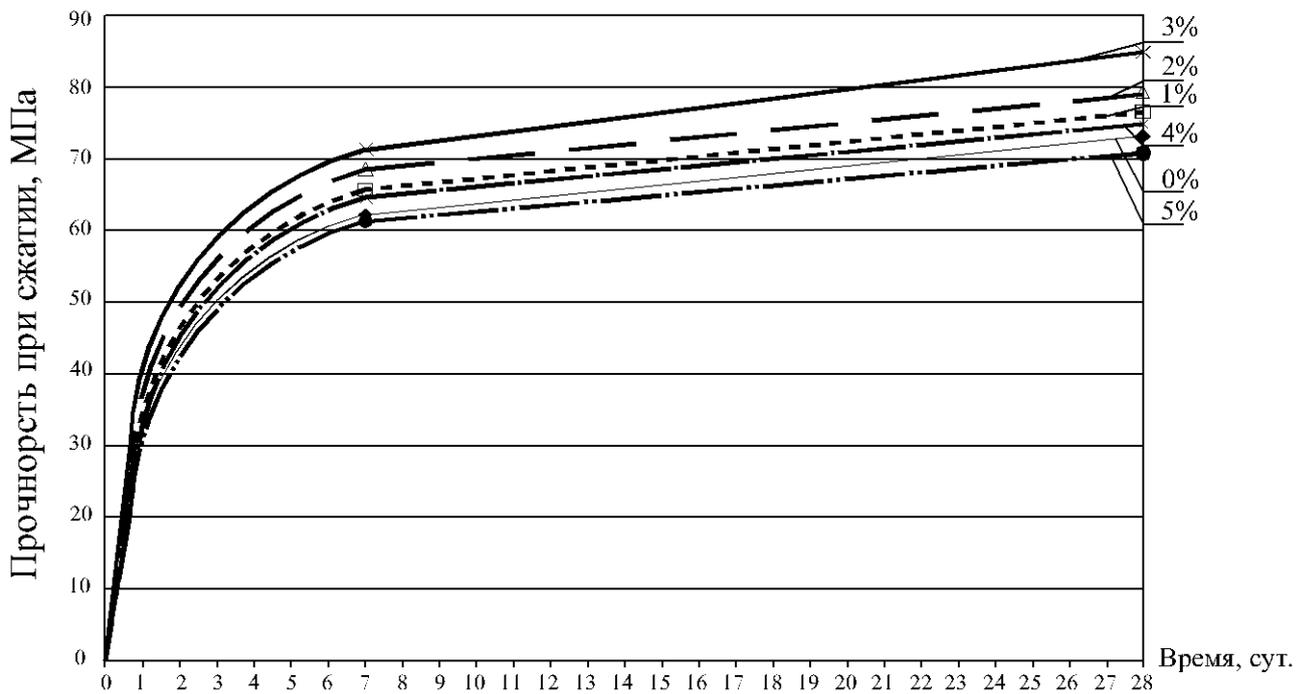


Рис. 3.4. Кинетика набора прочности цементного камня, армированного базальтовым волокном. Составы получены при постоянном водоцементном отношении (В/Ц=0,25). Цифры у кривых показывают процент БВ от массы Ц.

Влияние базальтового волокна на прочность при сжатии цементного камня оценивалось на образцах кубах размером 2х2х2 см, приготовленных из цементного теста, как нормальной густоты, так и при постоянном водоцементном отношении. За исследуемый параметр было принято процентное содержание волокна в смеси, принимаемое по массе от навески цемента. Результаты представлены на рис. 3.3., 3.4.

Как видно из рис. 3.3 наибольшую прочность цементный камень имеет при 4% содержании волокна - прирост прочности во все сроки твердения превосходит контрольный. На 3 суток нормальных условий хранения цементного камня прирост прочности по сравнению с контрольным составом без волокна составляет 28% (73 МПа), на 7 суток - 32% (84 МПа), на 28 суток — 34% (98 МПа). Несмотря на увеличение водоцементного отношения с 0,24 (нормальная густота контрольного состава без волокна) до 0,26 (при 4% содержании волокна в цементном тесте) происходит увеличение прочности. Следует отметить, что при увеличении времени выдержки в нормальных условиях хранения прирост прочности по сравнению с контрольным составом увеличивается, что позволяет сделать вывод об увеличении прочности сцепления цементного камня с базальтовым волокном и более полного использования волокна в цементном камне. В составах с содержанием волокна 5 и 6% наблюдается снижение прочности из-за значительного увеличения водоцементного отношения до 0,28 и 0,33 соответственно.

Рис. 3.4. отображает кинетику твердения цементного камня армированного базальтовым волокном при неизменном водоцементном отношении. Все образцы изготавливались при постоянном водоцементном отношении 0,25. Наибольшую прочность при таких условиях формирования показал состав с 3% содержанием волокна от массы

цемента. Прочность состава с 3% содержанием волокна составила на 3 сутки — 59 МПа, 7 сутки — 71 МПа, 28 сутки — 85 МПа, что превосходит контрольный состав без волокна на 8%, 16%, 19% в соответствующие сроки твердения. В составах с 4% и 5% содержанием волокна при неизменном водоцементном отношении (В/Ц=0,25) наблюдалось комкование фибры, вследствие чего ухудшалась формуемость образцов и уменьшалась их плотность (табл. 3.1).

Таблица 3.1

Влияние БВ на удобоукладываемость ц.т. и плотность цементного камня

Содержание базальтового волокна, %	В/Ц	Расплав конуса, мм	Плотность цементного теста, $\rho_{шт}$ , Г/СМ <sup>3</sup>	Плотность цементного камня, $\rho_{цк}$ , Г/СМ <sup>3</sup>
0	0,24 (НГ)	95	2,19	2,26
1	0,245	95	2,21	2,28
2	0,25	94	2,22	2,29
3	0,255	95	2,23	2,31
4	0,26	94	2,23	2,29
5	0,26	94	2,19	2,26

	27	4		7
6	0,	9	2,17	2,2
	28	4		1
0	0,	9	2,18	2,2
	25	8		3
1		9	2,2	2,2
		7		7
2		9	2,22	2,2
		4		7
3		9	2,21	2,2
		1		8
4		8	2,15	2,2
		5		1
5		7	2,11	2,1
		5		5

Влияние базальтового волокна на прочность при изгибе цементного камня приведен на рис. 3.5. Как свидетельствуют результаты исследований введение базальтового волокна в состав цементного камня существенно повышает его прочность при изгибе. При введении базальтового волокна в количестве 3% от массы вяжущего прочность цементного камня на изгиб повышается более чем в 2 раза.

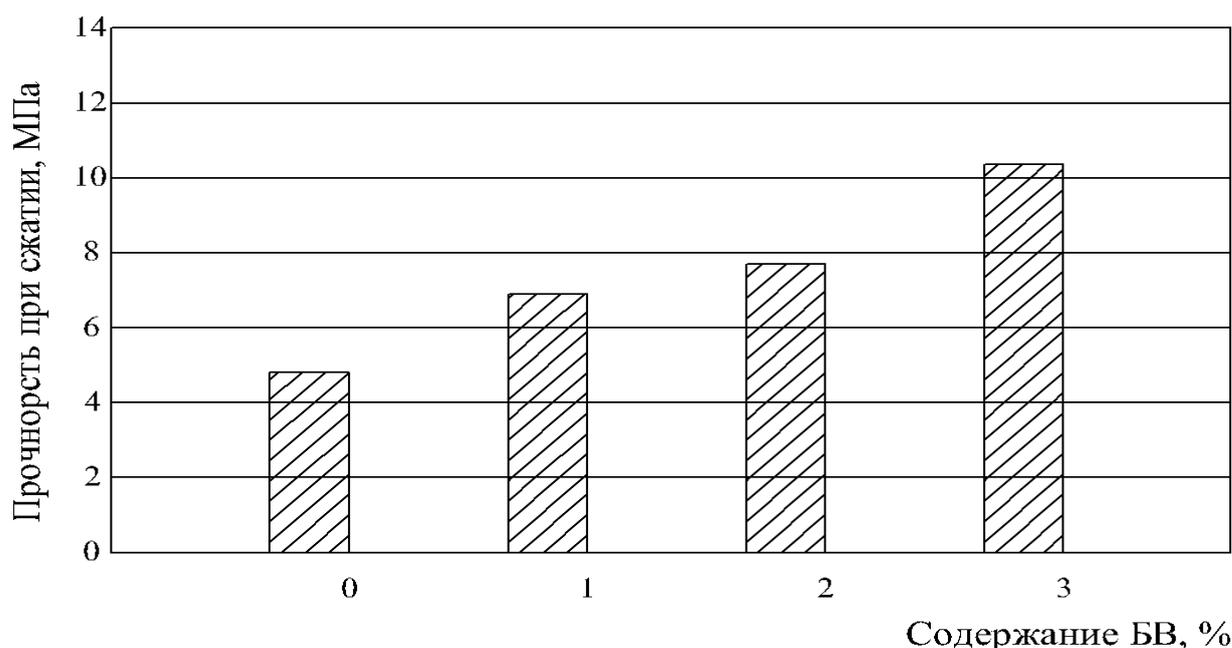


Рис.3.5. Влияние базальтового волокна на прочность цементного камня при изгибе

Влияние пластификаторов на физико-механические характеристики цементного камня армированного базальтовым волокном оценивалось на образцах балочках размерами 20x20x80мм и образцах кубах размерами 20x20x20мм. Выбор пластифицирующих добавок производился по их составу. Был выбран наиболее доступный суперпластификатор на основе продуктов конденсации нафталинсульфокислоты С-3, производства фирмы ПОЛИПЛАСТ (Россия).

С целью выявления наиболее эффективных дозировок суперпластификатора С-3 образцы изготавливались при **4%** содержании базальтового волокна от массы цемента. Процедура подготовки компонентов соответствовала наиболее оптимальной, согласно рекомендациям [51]. Оценка подвижности составов производилась по расплыву стандартного конуса. Расплыв стандартного конуса, соответствующий нормальной густоте цементного теста по прибору Вика, составляет 94-95см. С целью определения оптимальной дозировки был выбран интервал содержания пластификатора от 0% до 3% с шагом 0,5% от массы цемента.

Результаты исследования представлены на рис. 3.6-3.7.

Как видно из графиков 3.6-3.7 на 3-й и 28-е сутки твердения образцов в нормально влажностных условиях наибольшую прочность при сжатии показал состав с 2,0 % -ным содержанием суперпластификатора С-3 и 4%-ным базальтового волокна от массы цемента. Прочность его на 3-й сутки составила 105 МПа, а на 28-е сутки - 147 МПа, что на 62% и на 67% превосходит контрольный состав с 2,0% содержанием С-3 в соответствующие сроки твердения. Как видно из графиков прирост прочности над контрольным составом с течением времени увеличивается, что говорит о более полном использовании волокон с увеличением прочности самой матрицы. Однако следует отметить, что разница в увеличении прочности в составах с 1,5 и 2,0%-ным содержанием суперпластификатора С-3 составляет 3%, что говорит о пределе пластифицирования цементного теста, который возможно достигнуть при использовании данного вида суперпластификатора с учетом оптимального способа его введения.

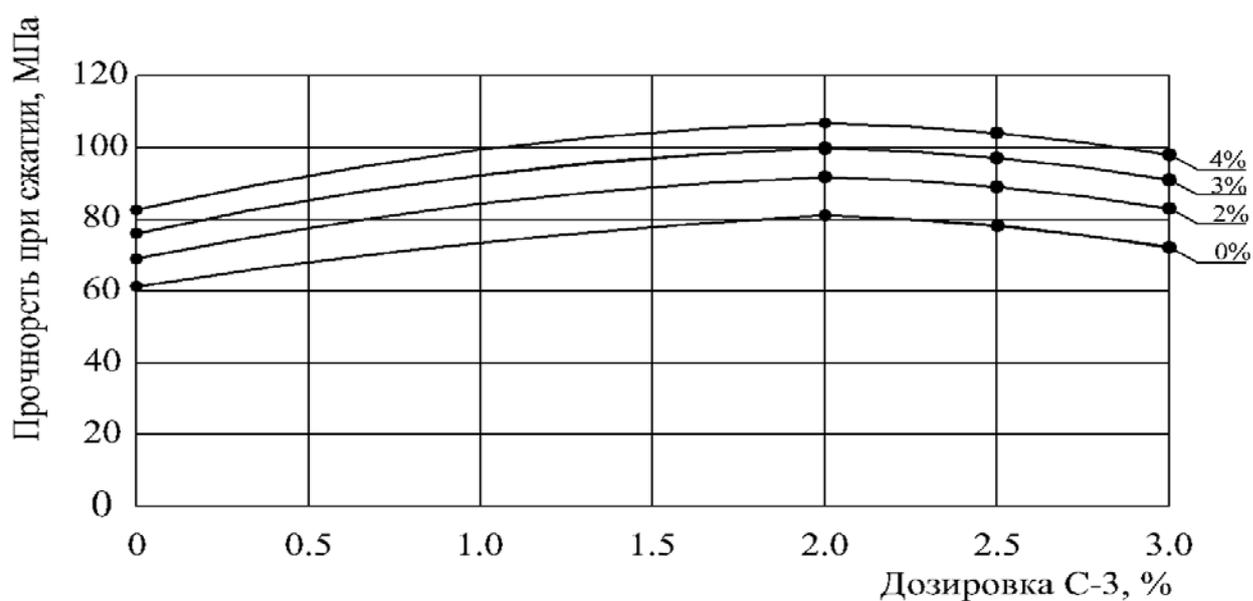


Рис. 3.6. Прочность на сжатие пластифицированного (С-3) базальтофиброцементного камня в возрасте 3 суток

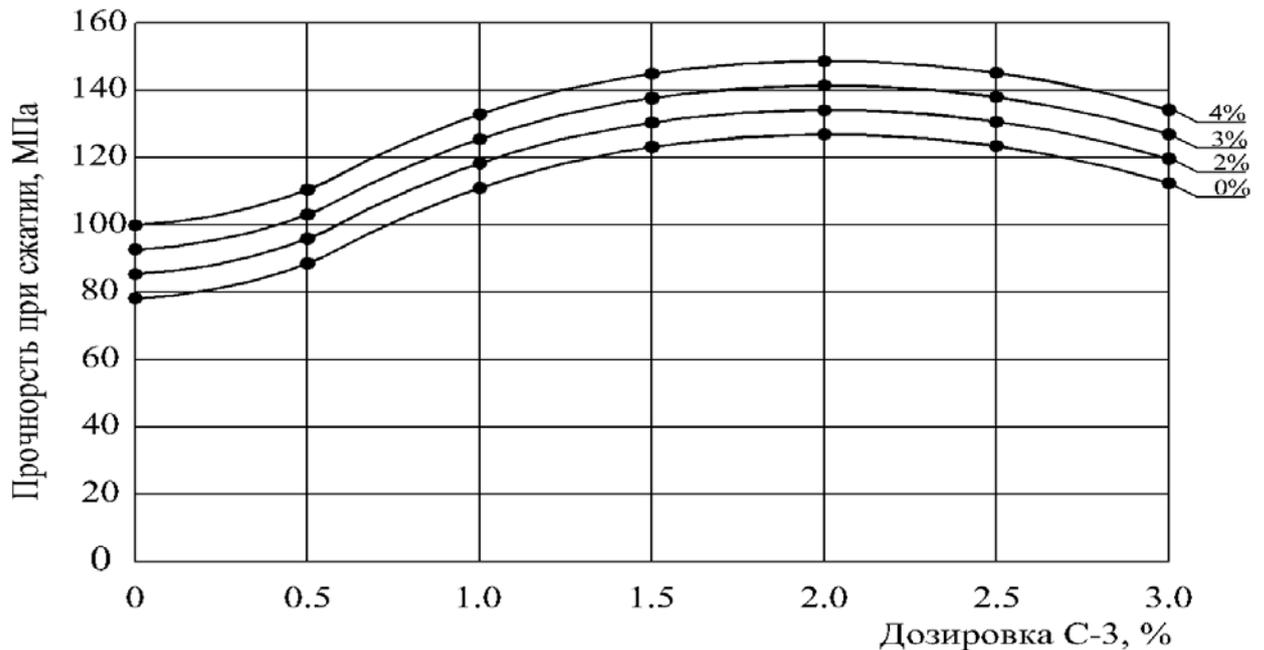


Рис. 3.7. Прочность на сжатие пластифицированного (С-3) базальтофиброцементного камня в возрасте 28 суток

### Выводы по главе 3

1. Экспериментально установлено количественное значение поглощения СаО из насыщенного раствора извести базальтовым волокном которое составляет  $0,18 \text{ кг/м}^2$ , что говорит о его химическом взаимодействии с продуктами гидратации портландцемента.

2. Учитывая то, что в процессе гидратации цемента СаО образуется в начальные сроки твердения, рекомендуется путем введения более активных минеральных наполнителей (в частности, золы – уноса Новоангенской ГРЭС ) регулировать степень взаимодействия щелочной среды с базальтовым волокном.

3. Выявлено, что наибольшую прочность базальтофиброцементный камень достигает при 4% содержании базальтового волокна - прирост прочности во все сроки твердения превосходит контрольный. При этом на 3

сутки нормальных условий хранения базальтофиброцементного камня прирост прочности по сравнению с контрольным составом без базальтового волокна составляет 28% (73 МПа), на 7 сутки - 32% (84 МПа), на 28 сутки - 34% (98 МПа).

3. Экспериментально доказано, что введение базальтового волокна в состав цементного камня существенно повышает его прочность при изгибе. При введении базальтового волокна в количестве 3% от массы вяжущего прочность цементного камня на изгиб повышается более чем в 2 раза.

4. Показано техническая целесообразность введения в состав базальтофиброцементного камня суперпластифицирующей добавки С-3. При этом наибольшая прочность при сжатии достигается при 2,0 % -ном содержанием суперпластификатора С-3 и 4%-ным базальтового волокна от массы цемента: прочность на 3 сутки составила 105 МПа, а на 28 сутки - 147 МПа, что на 62% и на 67% превосходит контрольный состав с 2,0% содержанием С-3 в соответствующие сроки твердения.

## **ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ БЕТОННОЙ СМЕСИ И БЕТОНА С БАЗАЛЬТОВЫМ ДИСПЕРСНО-ВОЛОКНИТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

### **4.1. Исследование свойств бетонной смеси с базальтовым наполнителем**

Применение дисперсного армирования для высокопрочных бетонов представляет интерес при условии неизменности или улучшения их

технологических свойств. Известно отрицательное влияние дисперсного армирования бетонов на реологические и технологические свойства бетонов. При этом следует иметь в виду, что дисперсное армирование производится именно на уровне цементного теста. Исследование влияния базальтового волокна на технологические свойства тонкозернистого бетона представляют большой интерес при изготовлении конструкций из него. Важными показателями здесь являются такие реологические характеристики, как предельное напряжение сдвига и структурная вязкость цементного теста, а также удобоукладываемость тонкозернистого бетона, армированного базальтовым волокном.

Динамический коэффициент вязкости (структурную вязкость) и величину предельного напряжения сдвига оценивали на дисперсно-армированном цементном тесте с помощью ротационного вискозиметра РВ-8 конструкции Волоровича М.П.

Изменение структурной вязкости в зависимости от предельного напряжения сдвига цементного теста армированного базальтовым волокном представлено на рис. 4.1.

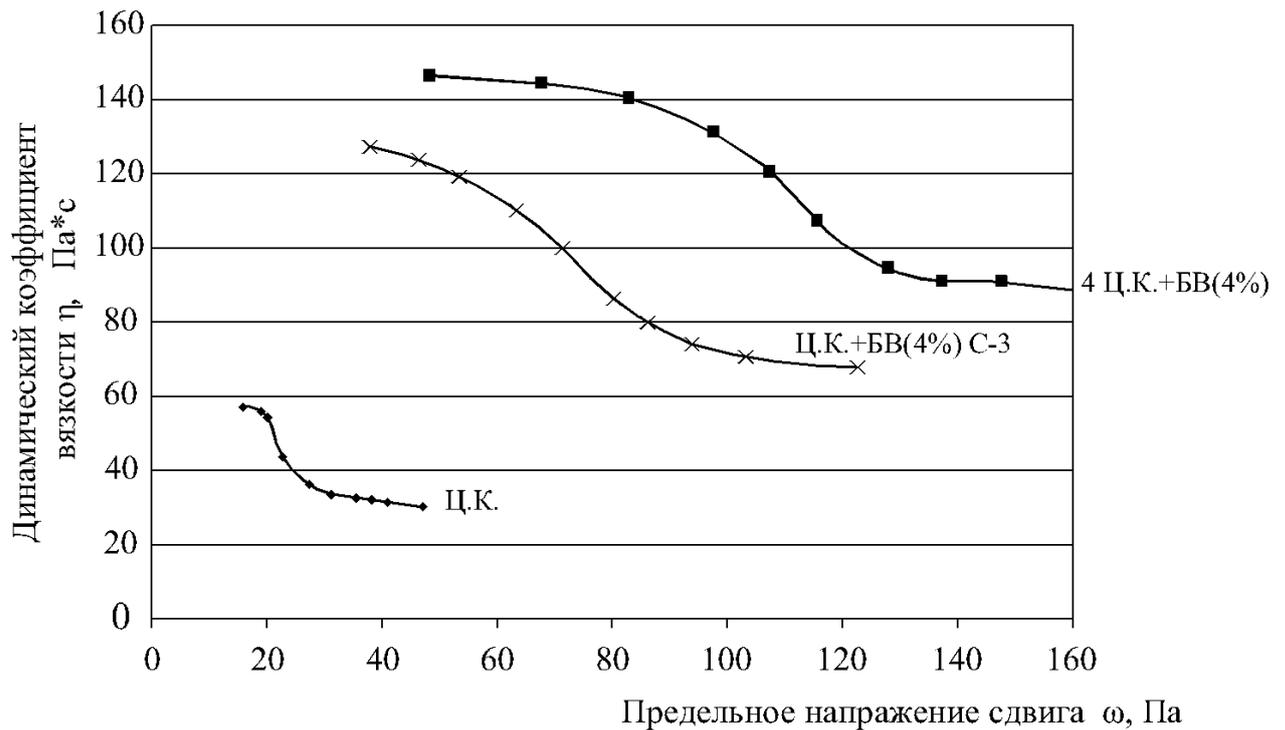


Рис.4.1. Зависимость структурной вязкости армированного цементного теста

Кривые вязкости типичны для воднодисперсных систем коагуляционного типа, каковыми являются цементные композиции. С увеличением  $\tau$  в определенном интервале, наблюдается переход (снижение) вязкости неразрушенной структуры к вязкости разрушенной.

При этом введение базальтового волокна увеличивает вязкость в 2-3 раза в обоих случаях, резко сдвигая интервал перехода в сторону больших напряжений сдвига. Суперпластификатор сдвигает кривую влево-вниз, т.е. сильно снижает структурную вязкость цементного теста с БВ.

#### 4.2. Исследование свойств бетона с базальтовым наполнителем

Получение высокопрочных мелкозернистых бетонов заключается не только в использовании оптимальной гранулометрии заполнителя, но и использованием активных минеральных дисперсных наполнителей, обладающих пуццолановыми свойствами, и суперпластификаторов, которые наиболее полно проявляют себя в цементно-песчаных смесях с высоким

содержанием вяжущего [8]. Мелкозернистый бетон является также наилучшей средой для дисперсного армирования. Исключение из состава бетона крупного заполнителя позволяет наиболее полно использовать дисперсную арматуру в его среде, что благоприятно сказывается на физико-механических характеристиках мелкозернистого бетона.

Основываясь на проведенных нами ранее исследованиях были изготовлены образцы дисперсно-армированные базальтовым волокном.

Волокно вводилось путем совместного помола с цементом, суперпластификатором и золой-уноса. Данный способ обеспечивает более полное распределение волокна в среде портландцемента и исключает образование комков при приготовлении бетонной смеси.

На оптимальном фракционном составе песчаного заполнителя, одинаковом соотношении Ц:П, добавке золы-уноса от массы цемента и разных соотношениях БВ и гиперпластификатора С-3 были изготовлены образцы мелкозернистого базальтофибробетона (табл.4.1).

Прочностные показатели дисперсно-армированного мелкозернистого бетона в 28 суточном возрасте нормального хранения представлены на рис 4.2

Таблица 4.1

Составы мелкозернистого бетона на фракционируемом заполнителе

№ п/п	Цемент, кг/м <sup>3</sup>	Кварцевый, песок, кг/м <sup>3</sup>	Зола-уноса, % от массы Ц	С-3, % от массы Ц	БВ, % от массы Ц
			кг/м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>	кг/м <sup>3</sup>
1	710	1460	-	-	-
2	710	1460	10/71	1,0/7,1	-
3	710	1460	10/71	1,0/7,1	1% /7,1
4	710	1460	10/71	1,5/10,7	3% /21,3
5	710	1460	10/71	2,0/14,2	4% /28,4
6	710	1460	10/71	2,0/14,2	5% /35,5

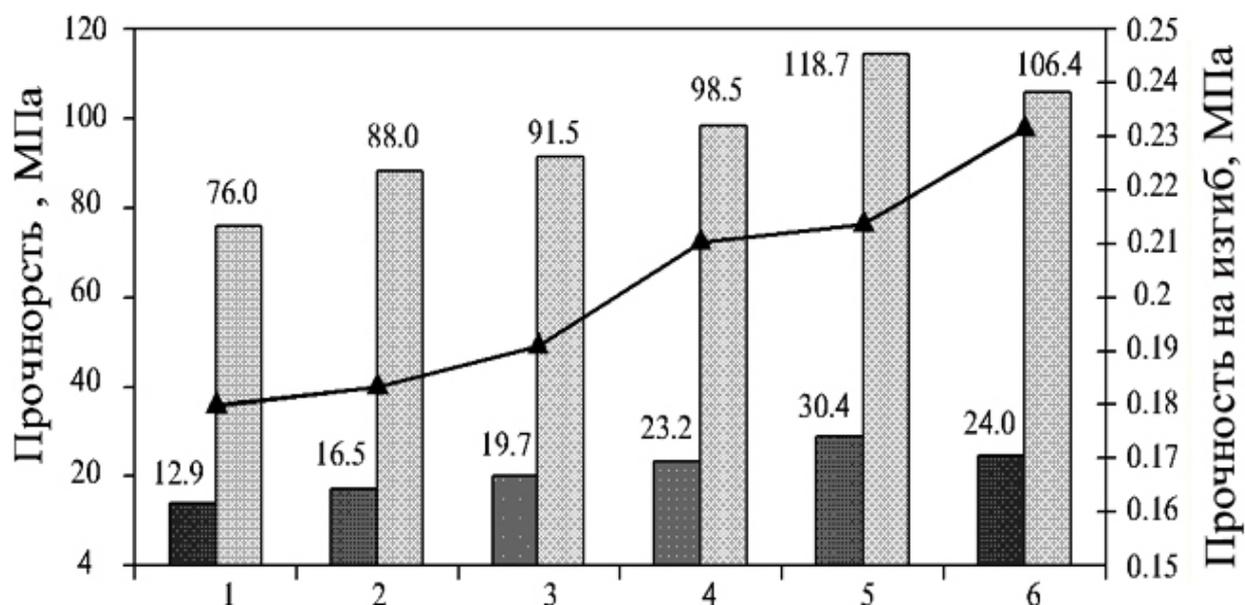


Рис 4.2. Прочностные показатели мелкозернистого базальтофибробетона.

Как видно из рис 4.2. наилучший результат показал состав с 4% содержанием волокна (состав №5). Его прочность на изгиб превосходит контрольный состав без волокна более чем в 2,2 раза по прочности на растяжение при изгибе и в 1,5 раза по прочности на сжатие. Следует также отметить, что при увеличении процентного содержания волокна водопотребность смеси увеличивается незначительно, что говорит о хорошем распределении волокна в смеси мелкозернистого бетона.

#### 4.3. Оптимизация состава бетона с базальтовым наполнителем

Подбор оптимального состава базальтофибро бетона произведен методом математического планирования экспериментов. Методика эксперимента изложена в главе 2. Оптимизацию состава производили почти в стационарной области, т.е. в области оптимума, так как из ранее проведенных опытов [63] эта область известна.

В качестве оптимизируемой величины принята прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения ( $R_{сж}^{28}$ ). Описание данного

свойства бетона производили полиномом второго порядка с тремя переменными факторами. В качестве переменных факторов были приняты:  
 $X_1$  – дозировка суперпластификатора С-3, % от массы смешенного вяжущего;  
 $X_2$  – содержание золы-уноса, % от массы цемента;  
 $X_3$  – степень наполнения базальтовым волокном, % от массы смешенного вяжущего.

В проведенных исследованиях был реализован план полного факторного эксперимента  $2^3$ . Центр эксперимента ( $X_0$ ) и интервалы варьирования переменных факторов ( $\Delta X_i$ ) приведены в табл.4.2. При назначении интервалов варьирования переменных факторов были использованы ранее полученные и опубликованные результаты исследований [25].

Таблица 4.2.

Исходные данные для планирования экспериментов

№	Исходные данные планирования	$X_1$	$X_2$	$X_3$
1	Центр эксперимента	2,0	10	4
2	Интервал варьирования	0,5	4	1
3	Верхний уровень	2,5	14	5
4	Нижний уровень	1,5	6	3
5	Звёздные точки: $+\alpha = +1,215$ $-\alpha = -1,215$	2,61 1,39	14,8 5,2	5.2 2,8

В результате реализации ортогонального плана полного факторного эксперимента  $2^3$  были получены следующие результаты (табл.4.3.)

Таблица 4.3.

Матрица планирования экспериментов и результаты испытаний

№ серии	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	Y <sub>экс</sub>	Y <sub>расч</sub>	Y <sub>расх</sub>
1	-1	-1	+1	52,40	52,49	-0,09
2	+1	-1	-1	57,10	58,19	-1,09
3	-1	+1	-1	56,20	56,75	-0,55
4	-1	+1	+1	60,20	59,25	1,05
5	-1	-1	-1	57,10	57,69	-0,59
6	+1	-1	+1	58,00	58,19	-0,19
7	-1	+1	+1	56,70	56,75	-0,05
8	+1	+1	-1	62,40	62,53	-0,13
9	- 1,215	0	0	55,20	55,79	-0,59
10	+1,215	0	0	61,10	61,02	0,08
11	0	- 1,215	0	61,50	60,80	0,70
12	0	+1,215	0	62,10	62,47	-0,37
13	0	0	- 1,215	63,80	63,90	-0,10
14	0	0	+1,215	59,70	60,19	-0,49
15	0	0	0	62,30	62,40	-0,10

Математической обработкой полученных результатов экспериментов были вычислены коэффициенты уравнения, описывающего прочность бетона на сжатие в возрасте 28 суток нормального твердения. Полученное уравнение имеет следующий вид:

$$R_{сж}^{28} = 62,3 + 2,82 X_1 + 1,30 X_2 + 2,07 X_3 - 2,95 X_1^2 - 0,88 X_2^2 - 1,75 X_3^2 - 1,23 X_1 X_2 X_3.$$

Технологический анализ математической модели прочности бетона  $R_{сж}^{28}$  производили графоаналитическим методом. Для этого были построены графические зависимости прочности бетона от группы технологических факторов. Анализ математической модели прочности бетона при введении

МЗН на основе суперпластификатора С-3 позволил сделать следующие выводы:

- наиболее значимым фактором в математической модели является дозировка добавки С-3 ( $X_1$ ), так как коэффициенты при  $X_1$  и  $X_1^2$  оказались наибольшими по абсолютной величине : +2,82 и -2,95. Различие в знаках при коэффициентах свидетельствует о том, что центр эксперимента выбран в области оптимума. Оптимальное значение дозировки суперпластификатора С-3 в составе составляет 2,1%;

- вторым по значимости фактором в математической модели является фактор  $X_3$  – степень наполнения базальтовым волокном базальтофибробетона. С увеличением содержания базальтового наполнителя в базальтофибробетон прочность будет снижаться и за пределами исследуемой области. Поэтому содержание базальтового волокна в базальтофибробетоне следует ограничить из условия достижения прочности бетона класса В40. Исходя из этих соображений, максимальная степень наполнения бетона базальтовой фиброй должен быть равной 4 %.

- наименее значимым фактором в математической модели является фактор  $X_2$ -содержание золы-уноса в базальтофибробетоне. Коэффициенты при  $X_2$  (+1,30) и  $X_2^2$  (- 0,88) также подтверждают, что центр эксперимента находится в области оптимума. Оптимальное значение содержание золы-уноса в базальтофибробетоне находится путем исследования уравнения регрессии на экстремум по переменному -  $X_2$ . Выявленное оптимальное значение содержание золы-уноса в базальтофибробетоне равняется 11 %;

Таким образом, применение золы-уноса, базальтового дисперсно-волокнутого наполнителя и суперпластификатора С-3 в мелкозернистых бетонных смесях и при двухстадийной технологии приготовления позволяет получить высокопрочный бетон класса В40 на рядовом цементе марки М400. При этом следует обеспечить оптимальное значение следующих технологических параметров: дозировка суперпластификатора С-3 в составе

базальтофибробетона - 2,1% от массы смешенного вяжущего ;содержание базальтового волокна в базальтофибробетоне - 4% ; содержание золы-уноса в базальтофибробетоне– 11%.

#### **Выводы по главе 4**

1. Экспериментально установлено, что введение базальтового волокна увеличивает структурную вязкость цементного теста в 2-3 раза, резко сдвигая интервал перехода в сторону больших напряжений сдвига. Введение в состав суперпластификатора С-3 сдвигает кривую относительно координатных осей влево-вниз, т.е. сильно снижает структурную вязкость цементного теста с базальтовым волокном.

2. С использованием математического метода планирования экспериментов установлена математическая модель прочности мелкозернистого базальтофибробетона, позволяющая оптимизировать его состав.

3. Выявлено, что применение золы-уноса, базальтового дисперсно-волокнутого наполнителя и суперпластификатора С-3 в мелкозернистых бетонных смесях при двухстадийной технологии приготовления позволяет получить высокопрочный мелкозернистый бетон класса В40 на рядовом цементе марки М400. При этом следует обеспечить оптимальное значение следующих технологических параметров: дозировку суперпластификатора С-3 - 2,1% от массы смешенного вяжущего ;содержание базальтового волокна - 4% от массы вяжущего; содержание золы-уноса – 11% от массы вяжущего.

## **ГЛАВА 5. ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ ФИБРОБЕТОНА С БАЗАЛЬТОВЫМ ДИСПЕРСНО-ВОЛОКНИТЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ**

### **5.1. Технология получения фибробетона с базальтовым дисперсно- волоконистым наполнителем**

Для изготовления мелкозернистого базальтофибробетона рассматривались несколько альтернативных вариантов. Как показала практика, наиболее рациональным является двухстадийная (двухэтапная) технология. На первой стадии изготовления механоактивированное композиционное вяжущее с базальтовой фиброй путем смещения-помола в мельнице (шаровой, вибрационной и др.) всех компонентов. Это сухое прощковое вяжущее может быть самостоятельным продуктом. На второй стадии производится фракционированный наполнитель оптимальной гранулометрии (рассев-дозирование 4-х фракций кварцевого песка) и его смешивание с сухим композиционным вяжущем и водой затворения в обычном лопастном смесителе как показано на рис. 5.1.

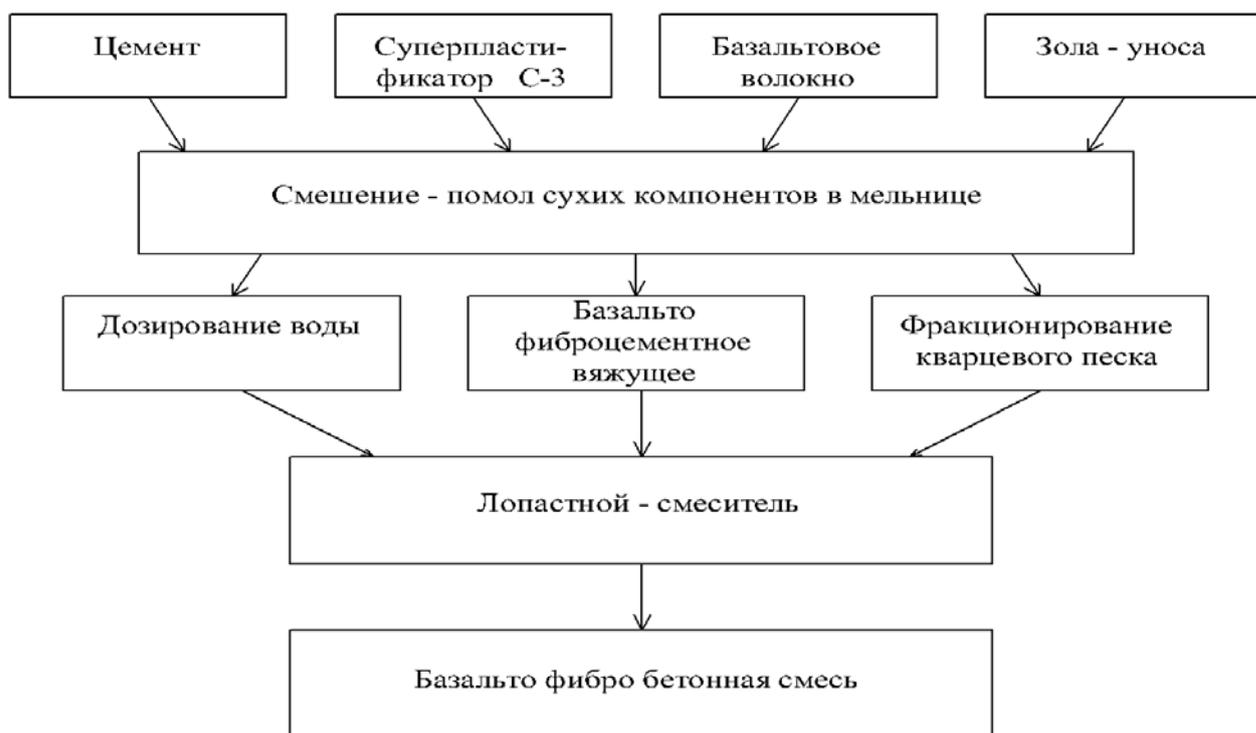


Рис. 5.1. Схема приготовления мелкозернистого базальтофибробетона

## 5.2. Рекомендации по производству фибробетона с базальтовым наполнителем

5.2.1. Настоящие рекомендации содержат указания по приготовлению базальтофибробетонной смеси и получению мелкозернистого базальтофибробетона класса В40 на рядовом цементе марки М400 при нормальных условиях твердения.

5.2.2. Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников предприятий стройиндустрии, предприятий малого и среднего бизнеса и содержат все необходимые сведения для получения базальтофибробетона в производственных условиях.

5.2.3. Для получения мелкозернистого базальтофибробетона необходимы следующие исходные материалы: цемент, базальтовое волокно(фибра), суперпластификатор С-3, кварцевый песок и вода.

5.2.4. В качестве вяжущего для получения базальтофибробетона применяются портландцемент марки М400, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 10178-85.

5.2.5. В качестве мелкозаполнителя применяются: кварцевые пески природные, дробленые, отвечающие требованиям ГОСТ 8736-85 и ГОСТ 10268-80.

5.2.6. В качестве микрозаполнителя применяется зола-уноса, отвечающая требованиям ГОСТ 25818-83.

5.2.7. В качестве пластифицирующей добавки применяется суперпластификатор С-3, отвечающий требованиям ТУ 6-36-0209229-625-90.

5.2.8. В качестве дисперсно-волоконного наполнителя применяется моноволокно диаметром 10 мм, производства ЧПП «Тризол-Н»(г.Навои).

5.2.9. Вода для затворения должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-79.

5.2.10. Оптимальный состав тонкозернистого базальтофибробетона определяется в лабораторных условиях. При этом рекомендуется обеспечивать оптимальные значения следующих технологических параметров: дозировка суперпластификатора С-3 -2,1% от массы смешенного вяжущего, содержание базальтового волокна в базальтофибробетоне – 4% от массы вяжущего, содержание микрозаполнителя (золы-уноса) – 11% от массы вяжущего.

5.2.11. Смешение-помол компонентов: цемента, базальтового волокна, золы-уноса и суперпластификатора С-3 производится в шаровых и вибрационных мельницах.

5.2.12. Перемешивание сухого активированного композиционного вяжущего и фракционированного мелкозернистого заполнителя с водой затворения осуществляется в лопастном смесителе.

5.2.13. На стадии подачи материалов в расходные бункеры, дозирования материалов никаких изменений в технологический процесс приготовления бетонных смесей не вносится.

5.2.14. Перед приготовлением бетонной смеси необходимо добиться в исправной работе помольного оборудования, смесителя и дозирующих устройств.

5.2.15. Общий цикл смешивания составляет 100-120 минут.

5.2.16. Контроль качества базальтофибробетонной смеси и бетона осуществляется в соответствии со СНиП 3.09.01-85 в 2 этапа:

А) первый этап включает:

- контроль всех технологических переделов и операций по приготовлению базальтофибробетонной смеси;
- отбор проб для контроля прочности по ГОСТ 18005-86;

Б) второй этап заключается:

- в оценке коэффициента вариации прочности базальтофибробетона.

5.2.17. Контроль выполняется в период освоения технологии базальтофибробетона – 1 раз в 2 недели; в дальнейшем – не реже 1 раз в месяц.

5.2.18. Коэффициент вариации прочности бетона должен соответствовать требованиям приведенным в ГОСТ 16349-85.

Как показала практика, наиболее рациональным является двухстадийная (двухэтапная) технология. На первой стадии изготовления готовят механоактивированное композиционное вяжущее с базальтовой фиброй путем смешения-помола в мельнице (шаровой, вибрационной и др.) всех компонентов. Это сухое прощковое вяжущее может быть самостоятельным продуктом. На второй стадии производится изготовление фракционированного заполнителя оптимальной granulometрии (рассев-дозирование 4-х фракций кварцевого песка) и его смешивание с сухим композиционным вяжущим и водой затворения. Смешивание на второй стадии производится в обычном лопастном бетоносмесителе как показано на рис. 5.1.

## **Выводы по главе 5**

1. Предложена наиболее рациональная двухстадийная (двухэтапная) технология получения мелкозернистого базальтофибробетона. На первой стадии изготовления приготавливается механоактивированное композиционное вяжущее с базальтовой фиброй: путем смешения-помола в мельнице (шаровой, вибрационной и др.) всех компонентов. Это сухое порошковое вяжущее может быть самостоятельным продуктом. На второй стадии, производится фракционирование и получение мелкого заполнителя оптимальной гранулометрии (рассев-дозирование 4-х фракций кварцевого песка), а затем смешивание мелкого заполнителя с сухим композиционным вяжущим и водой затворения. Смешивание на второй стадии производится в обычном лопастном бетоносмесителе.

## **ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ**

1. Экспериментально установлено количественное значение поглощения CaO из насыщенного раствора извести базальтовым волокном которое составляет  $0,18 \text{ кг/м}^2$ , что говорит о его химическом взаимодействии с продуктами гидратации портландцемента.

2. Учитывая то, что в процессе гидратации цемента CaO образуется в начальные сроки твердения, рекомендуется путем введения более активных

минеральных наполнителей (в частности, золы – уноса Новоангенской ГРЭС) регулировать степень взаимодействия щелочной среды с базальтовым волокном.

3. Выявлено, что наибольшую прочность базальтофиброцементный камень достигает при 4% содержании базальтового волокна - прирост прочности во все сроки твердения превосходит контрольный. При этом на 3 сутки нормальных условий хранения базальтофиброцементного камня прирост прочности по сравнению с контрольным составом без базальтового волокна составляет 28% (73 МПа), на 7 сутки - 32% (84 МПа), на 28 сутки - 34% (98 МПа).

4. Экспериментально доказано, что введение базальтового волокна в состав цементного камня существенно повышает его прочность при изгибе. При введении базальтового волокна в количестве 3% от массы вяжущего прочность цементного камня на изгиб повышается более чем в 2 раза.

5. Показана техническая целесообразность введения в состав базальтофиброцементного камня суперпластифицирующей добавки С-3. При этом наибольшая прочность при сжатии достигается при 2,0 % -ном содержанием суперпластификатора С-3 и 4%-ным базальтового волокна от массы цемента: прочность на 3 сутки составила 105 МПа, а на 28 сутки - 147 МПа, что на 62% и на 67% превосходит контрольный состав с 2,0% содержанием С-3 в соответствующие сроки твердения.

6. Экспериментально установлено, что введение базальтового волокна увеличивает структурную вязкость цементного теста в 2-3 раза, резко сдвигая интервал перехода в сторону больших напряжений сдвига. Введение в состав суперпластификатора С-3 сдвигает кривую относительно координатных осей влево-вниз, т.е. сильно снижает структурную вязкость цементного теста с базальтовым волокном.

7. С использованием математического метода планирования экспериментов установлена математическая модель прочности мелкозернистого базальтофибробетона, позволяющая оптимизировать его состав.

8. Выявлено, что применение золы-уноса, базальтового дисперсно-волокнутого наполнителя и суперпластификатора С-3 в мелкозернистых бетонных смесях при двухстадийной технологии приготовления позволяет получить высокопрочный мелкозернистый бетон класса В40 на рядовом цементе марки М400. При этом следует обеспечить оптимальное значение следующих технологических параметров: дозировку суперпластификатора С-3 - 2,1% от массы смешенного вяжущего; содержание базальтового волокна - 4% от массы вяжущего; содержание золы-уноса – 11% от массы вяжущего.

9. Предложена наиболее рациональная двухстадийная (двухэтапная) технология получения мелкозернистого базальтофибробетона. На первой стадии изготовления приготавливается механоактивированное композиционное вяжущее с базальтовой фиброй: путем смешения-помола в мельнице (шаровой, вибрационной и др.) всех компонентов. Это сухое порошковое вяжущее может быть самостоятельным продуктом. На второй стадии производится фракционирование и получение мелкого заполнителя оптимальной гранулометрии (рассев-дозирование 4-х фракций кварцевого песка) и его смешивание с сухим композиционным вяжущем и водой затворения. Смешивание на второй стадии производится в обычном лопастном бетоносмесителе.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Адылходжаев А.И., Тахиров М.К., Самигов Н.А. О полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Сб. науч. трудов ТАСИ.- Ташкент, 2008.- С 10-16.
2. Ахвердов И. Н. Теоретические основы бетоноведения. - Минск: Высшая школа, 1991. - 390 с.
3. Баженов Ю.М. Новому веку — новые эффективные материалы и технологии // Строительные материалы, оборудование и технологии XXIв.- 2001.-№1.-С. 12-13.
4. Баженов Ю.М. Бетоны XXI века // Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций / Материалы Международной конференции. - Белгород, 1995. - С. 3-5.
5. Баженов Ю.М. Технология бетонов XXI века / Академические чтения РААСН. Новые научные направления строительного материаловедения. Часть 1. - Белгород, 2005. - С. 9-20.
6. Баженов Ю.М., Фаликман В.Р. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии // Материалы I Всероссийской конференции. - М., 2001. - С. 91-101.

7. Баженов Ю.М. Высокопрочный бетон с химическими добавками // Бетон и железобетон. - 1977, № 8. - С. 29-31.
8. Баженов Ю.М. Многокомпонентный мелкозернистый бетон для высотного строительства // Сборник докладов. II Международный симпозиум по строительным материалам КНАУФ для СНГ «Современное высотное строительство. Эффективные технологии и материалы». - М., 2005. - С. 7-73.
9. Батраков В.Г. Теория и перспективные направления развития работ в области модифицирования цементных систем // Цемент и его применение. - М., 1999.-№11-12.-С. 14-19.
10. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп..- М., 1998.- 768 с.
11. Бучкин, В.Ф. Степанова. Цементные композиции повышенной коррозионной стойкости, армированные базальтовыми волокнами // Строительные материалы. 2006. — №7 — С. 12-16/
12. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве // Строительные материалы. - 2004. - №6. - С. 12-13.
13. Волков И.В. Фибробетонные конструкции // Обз. инф. Серия «Строительные конструкции». Вып. 2. - М.: ВНИИИС Госстроя СССР, 1988. -18 с.
14. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве // Строительные материалы — 2004. - №6. - С. 13-15
15. Волков И.В. Фибробетон - состояние и перспективы применения в строительных конструкциях // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в.-2005.-№4.-С. 24-25
16. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве // Строительные материалы.-2005.-№6.-С. 27-29.

17. Власов В.К. Закономерности оптимизации состава бетона с дисперсными минеральными добавками // Бетон и железобетон. - 1993. - №4. - С. 10-12.
18. Глекель Ф.Л. Физико-химические основы применения добавок к минеральным вяжущим. - Ташкент, изд-во "Фан", 1974. - 123 с.
19. Глекель Ф.Л., Кооп Р.З., Ахмедов К.С. Регулирование гидратационного структурообразования поверхностно-активными веществами. - Ташкент, изд-во "Фан", 1986. - 223 с.
20. Добролюбов Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавкой. - М.: Стройиздат, 1983. - 212 с.
21. Демьянова В.С. Калашников С.В., Казина Г.Н., Тростянский В.М. Многокомпонентные дисперсно-армированные бетоны с улучшенными эксплуатационными свойствами // Международная научно-практическая конференция. Девяты́е Академические чтения РААСН "Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения" - Казань, 2006. с. 161-163.
22. Демьянова В.С., Калашников В.И. Быстротвердеющие высокопрочные бетоны с органоминеральными модификаторами // Пенза: ПГУАС, 2003.-195 с.
23. Дворкин Л.И., Кизима В.П. Эффективные литые бетоны. - Львов: Вища школа, 1986. - 142 с.
24. Добролюбов Г.Г., Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Прогнозирование долговечности бетона с добавками, - М.: Стройиздат, 1983. - 212 с.
25. Звездов А.И., Волков Ю.С. Бетон и железобетон: наука и практика // Материалы I Всероссийской конференции по бетону и железобетону. - М., - 2001.-С. 288-297.
26. Зазимко В.Г. Оптимизация свойств строительных материалов. - М.: Транспорт, 1981. - 103 с.

27. Иванов Ф.М., Шипулин А.А. Бетон на шлакопортландцементе с суперпластификатором С-3 // Бетон и железобетон.1981.- № I.- С.10 -12.
28. Исследование и применение бетонов с суперпластификаторами // Сб. науч. тр./ НИИЖБ Госстроя СССР. - М., 1982. - 159 с.
29. Курбатов Л.Г. Проектирование и изготовление сталефибробетонных конструкций: Обзорная информация ЦНТИ Госгражданстроя. - Л., 1985.-55 с.
30. Курбатов Л.Г., Рабинович Ф.Н. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами. // Бетон и железобетон. - 1980. - № 3. - С.6-7.
31. Комохов П.Г. О бетоне XXI века // Вестник РААСН. - М., 2001. - №5.- С.
32. Комохов П.Г., Грызлов В.С. и др. Оценка модификации бетона на макро- и микроуровне // Общие проблемы и решения теории и практики строительного материаловедения / Доклад к Международной конференции. 4.1. - Казань: КГАСА, 1996.-С. 14-18.
33. Копацкий А.В., Курбатов Л.Г., Ефремова В.М. Структура бетонной составляющей зон сталефибробетона с повышенным содержанием крупных фибр // Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов: Межвуз. темат. сб. науч. тр. - Д.: ЛИСИ, 1986. - С.44 -49.
34. Крылов Б.А. Фибробетон и его применение в строительстве - М.: Стройиздат, 1979. - 173 с.
35. Касимова С.С., Тулаганов А.А. Нанотехнологии в производстве цемента (обзор) // Сб. науч. трудов ТАСИ.- Ташкент, 2008.- С 65-69.
36. Ким К.Н. Методика исследования реологических свойств бетонной смеси, М., НИИЖБ, вып. 29, 1977 – С 2-16.

37. Леонтьев В.Н., Приходько В.А., Андреев В.А. О возможности использования углеродных волокнистых материалов для армирования бетонов // Строительные материалы. - 1991. - №10. - С. 27-28.
38. Михайлов В.В., Волков Ю.С. Бетон и железобетонные конструкции. Состояние и перспективы применения в промышленном и гражданском строительстве. - М.: Стройиздат, 1983. - 358 с.
39. Михайлов В.В., Беликов В. А. Перспективы применения конструкций из высокопрочных бетонов // Бетон и железобетон. - 1982. - №5. - С. 7-8.
40. Маилян Р.Л., Маилян Л.Р., Осинков К.М. и др. Рекомендации по проектированию железобетонных конструкций из керамзитобетона с фибровым армированием базальтовым волокном. - Ростов н/Дону, 1996. - 14с.
41. Маилян Р.Л., Аль-Хужейри Халед, Польской П.П. Влияние фибрового армирования на трещиностойкость наклонных сечен
42. Маилян Л.Р., Шилов Ал.В., Джаварбек Н. Влияние фибрового армирования базальтовым волокном на свойства легкого и тяжелого бетонов // Новые исследования бетона и железобетона. - Ростов н/Д, 1997. - С. 7-12.
43. Малинина Л.А., Королев К.М., Рыбасов В.Н. Опыт изготовления изделий из фибробетона в СССР и за рубежом: Обзор ВЕИИЭСМ. - М., 1981.
44. Махаматалиев Э. М. О новой стратегии применения полиструктурной теории композиционных строительных материалов в исследованиях по совершенствованию технологии наполненных бетонов// Сб. науч. трудов ТАСИ.- Ташкент, 2008.- С 34-37.
45. Махаматалиев Э. М. Бетон на активированном вяжущем и с зольным наполнителем: Автореферат. дис. канд. техн. наук: 05.23.05- Ташкент 1993- 23 с.

46. Новая добавка для бетона / Логинова Т.Н. - Ташкент, 1985. - (Информ. листок/ УзНИИНТИ, № 85-38).
47. Новая комплексная добавка / Алиев А.Г., Борисов М.Е., Алиев Р.Н., - Ташкент, 1985. - (Информ. листок/ УзНИИНТИ; №. 777-85).
48. Пашенко А.А. Сербии В.П. Паслаская А.П. и др. Армирование неорганических вяжущих веществ минеральными волокнами. - М.:Стройиздат. 1988. -201с.
49. Погорелов СИ. Повышение долговечности сталефибробетонов путем использования шлаковых цементов // Работоспособность строительных материалов при воздействии различных эксплуатационных факторов: Межвузовский сборник. - Казань: КХТИ, 1988. - С. 99-101.
50. Прасолов Е.Я., СопильнякА.В., Клименко Е.В. Количественная оценка ползучести сталефибробетона // Работоспособность строительных материалов при воздействии различных эксплуатационных факторов: Межвузовский сборник. - Казань: КИСИ, 1988. - С. 52-53.
51. Применение суперпластификаторов в бетоне. Обзорная информация. - ВНИИМС Госстроя СССР, 1982. - 58 с.
52. Ратинов В.Б., Розенберг Т.Й., Кучеряева Т.Д. Комплексные добавки для бетона // Бетон и железобетон. - 1981. - № 9. - С.9-10.
53. Рекомендации во применению химических добавок в бетоне. - М.: Минстрой СССР, 1985. – 17 с.
54. Рекомендации по определению оптимальной дозировки химических добавок в бетонах / Госстрой УзССР. - Ташкент, 1983. - 23с.
55. Рабинович Ф.Н., Курбатов Л.Г. Применение сталефибробетона в конструкциях инженерных сооружений // Бетон и железобетон. - 1984. - № 12.-С. 22-25.
56. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография - М.: Издательство АСВ, 2004. - 560с.

57. Рабинович Ф.Н. Применение фиброармированных бетонов в конструкциях промзданий // Фибробетон и его применение в строительстве: Труды НИИЖБ. - М., 1979. - С. 27-38.
58. Рабинович Ф.Н. Бетоны, дисперсно-армированные волокнами: Обзор ВПИИЭСМ. - М., 1976. - 73 с.
59. Рабинович Ф.Н., Романов В.П. О пределе трещиностойкости мелкозернистого бетона, армированного стальными фибрами // Механика композитных материалов, - 1985.-№ 2. - С. 277-283.
60. Рабинович Ф.Н. Оптимальные параметры дисперсного армирования фибробетонных конструкций // Транспортное строительство- 1998.- №8.- с.20-23.
61. Рабинович Ф.Н. Об уровнях дисперсности армирования бетонов // Строительство и архитектура: Изв. вузов. -1981.-№11.-С. 30-36.
62. Рабинович Ф.Н. Еткин Н.В. Перспективы освоения производства базальтовых волокон на базе Норильского горно-металлургического комбината//Строительные материалы.-1997.-№8-С.6-7.
63. Рабинович Ф.Н., Зуева В.Н., Макеева Л.В. Устойчивость базальтовых волокон в среде гидратирующихся цементов // Стекло и керамика. 2001. -№12 - С.29-32.
64. Рамачандран В. и др. Добавки в бетон: Справочное пособие. - М.: Стройиздат, 1988. - С.575.
65. Соломатов В.И. Проблемы современного строительного материаловедения // Общие проблемы и решения теории и практики строительного материаловедения / Докл. к Международной конференции. - Казань: КГАСА. Ч.1., 1996.-С3-9.
66. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Коротин М.М. Бетон с АЦФ добавкой для транспортного строительства. - М.: Транспорт, 1986.
67. Соломатов В.И., Тахиров М.К., Ханин В.К. Ресурсосберегающая технология бетона.- Ташкент: Мехнат, 1990.-239 с.

68. Сталефибробетон и конструкции из него. Серия «Строительные материалы» Вып. 7 ВНИИНТПИ. - М., 1990.
69. Стеклофибробетон и конструкции из него. Серия «Строительные материалы». Вып.5. ВНИИНТПИ.
70. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Под ред. Г.И.Горчакова. - М.: Стройиздат, 1986. - 143 с.
71. Суперпластификатор разжижитель СМФ/ Батраков В.Г. и др.// Бетон и железобетон. - 1985. - № 5. - С. 18-20.
72. Фибробетон в Японии. Экспресс-информация. Строительные конструкции». - М, ВНИИИС Госстроя СССР, 1983. - 26 с.
73. [http://www.ereмонт.ru/enc/materials/beton/beton\\_sv.html](http://www.ereмонт.ru/enc/materials/beton/beton_sv.html)
74. <http://www.audax.ru/products/construction/additives/fm/scc/>
75. [http://www.formulalsr.ru/beton\\_rastvor/articles/sub.htm](http://www.formulalsr.ru/beton_rastvor/articles/sub.htm)