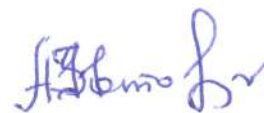


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»

На правах рукописи



Зотов Александр Николаевич

**СТРУКТУРА И СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННЫХ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ С ПОЛИПРОПИЛЕНОВОЙ ФИБРОЙ**

05.23.05 - Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
кандидат технических наук
доцент, Соболев Г.М.



Кострома - 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
Глава 1. Состояние вопроса, цели и задачи исследований	10
1.1 Особенности применения и механизм действия микрокремнезема в цементных системах.....	11
1.2 Особенности применения гиперпластификаторов и механизм модификации цементной матрицы.....	17
1.3 Особенности применения микроволокон для дисперсного армирования бетонов.....	20
1.4 Опыт применения фибробетонов в России и за рубежом.....	28
Глава 2. Применяемые материалы и методы исследований	33
2.1 Применяемые материалы.....	33
2.2 Методы исследований.....	39
Выводы по 2-й главе.....	51
Глава 3. Особенности разработки составов и исследование структуры модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй	52
3.1 Способы производства и применения вяжущего с микрокремнеземом.....	53
3.2 Влияния мелкого заполнителя на свойства мелкозернистых бетонов.....	56
3.3 Особенности влияния полипропиленовой фибры на технологические и прочностные свойства мелкозернистого бетона.....	59
3.4 Микроструктура цементного камня с модифицирующими добавками.....	70
Выводы по 3-й главе.....	80
Глава 4. Технологические свойства фибробетонных смесей, особенности структурообразования, набора прочности и усадки мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй	81
4.1 Технологические свойства многокомпонентного вяжущего.....	81
4.2 Технологические свойства мелкозернистых бетонов при разных соотношениях между песком и цементом.....	84

4.3 Технологические свойства мелкозернистых бетонов с полифункциональной добавкой – гиперпластификатором.....	87
4.4 Технология применения полипропиленовой фибры в мелкозернистых бетонных смесях.....	92
4.5 Особенности формирования структуры мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....	94
4.6 Особенности кинетики набора прочности мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....	99
4.7 Усадочные деформации мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....	101
Выводы по 4-й главе.....	108

Глава 5. Прочностные свойства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....

5.1 Прочностные свойства мелкозернистых бетонов на основе многокомпонентного вяжущего.....	109
5.2 Прочность и трещиностойкость мелкозернистых бетонов с термообработанной полипропиленовой фиброй.....	111
5.3 Прочностные свойства мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй при разных соотношениях песка и цемента.....	119
5.4 Прочностные свойства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....	122
5.5 Морозостойкость и водонепроницаемость модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....	130
5.6 Долговечность модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй.....	133
5.7 Методика определения состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй.....	135
Выводы по 5-й главе.....	146

Глава 6: Опытное - промышленное внедрение результатов исследования.....

6.1	Опытно - промышленное испытание и внедрение технологии модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.....	148
6.2	Разработка положений изобретения - состав фибробетона.....	151
6.3	Экологические аспекты производства полипропиленовой фибры и применения в строительстве.....	156
	Заключение.....	159
	Список литературы.....	162
	ПРИЛОЖЕНИЯ.....	174
	Решение о выдаче патента на изобретение.....	175
	Патент на изобретение.....	177
	Акт внедрения научно – технического мероприятия № 1.....	178
	Акт внедрения научно – технического мероприятия № 2.....	181
	Протокол радиологических исследований.....	184
	Рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций.....	186
	Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий.....	235
	Отчет о научно — исследовательской работе «Исследование свойств и испытание дорожных изделий и конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй».....	252

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы

В настоящее время огромный интерес проявляется к способам модифицирования мелкозернистых бетонов и улучшению их свойств. Научные исследования, опыт производственного применения и анализ недостатков мелкозернистого бетона показывают, что совершенствование его показателей качества сводится к введению микронаполнителей, полифункциональных химических добавок и дисперсного армирования. Однако, взаимодействие модифицирующих компонентов и их совместное влияние на формирование свойств бетона на микро- и макроуровнях исследованы недостаточно.

В связи с этим, изучение данных процессов позволит решить вопросы оптимизации составов и технологии получения модифицированных мелкозернистых фибробетонов с высокими эксплуатационными характеристиками, что весьма актуально, поскольку рациональной областью применения таких композитов являются дорожные, мостовые, гидротехнические и военные сооружения и конструкции, работающие в агрессивных средах и в суровых климатических условиях, а также ремонтные и инъекционные смеси.

Диссертационная работа выполнена в соответствии с тематическим планом научно - исследовательских работ ФГБОУ ВО Костромской ГСХА.

Степень разработанности темы исследования

Вопросам изучения и совершенствования свойств фибробетонов посвящены многочисленные работы российских и зарубежных ученых. Имеется большой опыт эффективного применения фибры при выполнении строительных работ и производстве фибробетонных изделий.

Однако, все разработки и исследования дисперсно - армированных бетонов с синтетическими волокнами на сегодняшний день основаны лишь на фундаментальных знаниях, которые получены в результате изучения технологических процессов изготовления, расчетов и проектирования конструкций из стале- и стеклофибробетона. Вопросы изучения механизмов взаимодействия компонентов смеси, теории расчета составов, технологии

производства и прогнозирования свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй по-прежнему остаются открытыми.

Научная гипотеза

Взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и низкомолекулярной полипропиленовой фибры в оптимальных дозировках позволяет увеличить седиментационную устойчивость цементной системы, регулировать технологические свойства смеси и значительно повысить прочностные, деформационные и эксплуатационные показатели качества мелкозернистого бетона за счет формирования более плотной и слитной структуры полиморфными модификациями оксида кремния и новообразованиями.

Цели и задачи работы

Целью настоящей работы является разработка модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй, исследование структуры и прогнозирование их физико – механических и эксплуатационных свойств.

В связи с этим основными задачами научной работы являются:

- исследование механизмов совместного влияния микронаполнителя, химической добавки и дисперсного армирования на технологические, прочностные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов;
- разработка методик подбора составов и развитие технологии изготовления модифицированного мелкозернистого фибробетона с заданными показателями качества;
- получение оптимизированных составов и прогнозирование свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй;
- разработка рекомендаций по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций;
- апробация разработанных составов, производственные испытания изделий и оценка их технико-экономической эффективности.

Научная новизна

1. Исследовано взаимодействие модификаторов в составе мелкозернистого бетона и установлено их влияние на формирование структуры, процессы

твердения и усадочные деформации в условиях квазистатической сушки.

2. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность значительного повышения прочности и трещиностойкости фибробетона за счет термической обработки фибры, способствующей деформированию волокон, ускорению гидролиза и экстракции аппретов с их поверхности.

3. Разработаны многофакторные математические модели расчета и прогнозирования технологических, прочностных и эксплуатационных свойств модифицированного мелкозернистого фибробетона при разных соотношениях песка и цемента (П/Ц) и с учетом структурных характеристик C и W .

4. Установлены оптимальные соотношения модифицирующих компонентов для достижения максимальных показателей прочности, морозостойкости и водонепроницаемости мелкозернистого бетона.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования

Теоретическая значимость работы заключается в разработке методик проектирования составов модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй и прогнозировании их свойств при помощи многофакторных зависимостей, полученных методами математического планирования эксперимента. Подтверждена возможность получения высокопрочного мелкозернистого фибробетона с низко модульными волокнами.

Практическая значимость заключается в том, что:

- разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй марок по удобоукладываемости Ж1-Ж3 и П1-П5, прочностью при сжатии до 84 МПа, прочностью на растяжение при изгибе до 7,5 МПа, морозостойкостью 600 циклов и водонепроницаемостью $18 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$;

- техническая новизна исследований подтверждается выдачей патента на изобретение РФ с № 2583965 С1 «Состав фибробетона» от 06.11.2014;

- произведены радиологические исследования модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй спектрометрическим методом и установлено соответствие полученных данных санитарно-эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к строительным материалам;

- разработаны «Рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций»;

- разработан «Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий» для ОАО «Костромской силикатный завод»;

- осуществлено внедрение результатов исследований на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома) при изготовлении тротуарной плитки в объеме 200 м² и бордюрных камней в количестве 780 шт;

- произведены испытания и оценка эксплуатационных свойств изделий из ММФБ, результаты которых отражены в научно – практическая работа «Исследование свойств и испытание дорожных изделий и конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй».

Методология и методы исследования

Теоретические исследования основаны на анализе и систематизации научно-технической литературы и методах математического планирования эксперимента. Эксперименты и испытания образцов проводились на лабораторном оборудовании с использованием стандартных методик и современной измерительной аппаратуры. Обработка полученных результатов производилась математико – статистическими методами при помощи ЭВМ.

Положения, выносимые на защиту:

– результаты исследований взаимодействия микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры и их влияния на формирование структуры и свойства модифицированного мелкозернистого фибробетона;

– результаты исследований термообработанной полипропиленовой фибры и ее влияния на прочность и трещиностойкость мелкозернистого бетона;

– результаты исследований микроструктуры, процессов структурообразования, кинетики набора прочности и усадочных деформаций модифицированных фибробетонов в условиях квазистатической сушки;

– математические модели технологических, прочностных и эксплуатационных свойств модифицированных мелкозернистых фибробетонов

при разных соотношениях П/Ц и с учетом структурных характеристик С и W;

– результаты опытно - промышленного внедрения составов модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.

Степень достоверности и апробация результатов работы

Достоверность результатов научных исследований и выводов подтверждена достаточным объемом экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях и подтвержденных апробацией на производстве.

Основные положения диссертационной работы докладывались на XVIII научно – методической конференции «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций» (СПб, ВИТУ (ВИИТ), 2014 г.); Студенческой научно – практической конференции СНК 2014 «Актуальные вопросы строительства и архитектуры», II научной конференции молодых ученых, аспирантов, магистрантов и студентов «Актуальные вопросы строительства и архитектуры» и 66-й международной научно – практической конференции «Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе» (Кострома, КГСХА, 2014 - 2015 гг.); Международной научно – практической конференции «Технические науки: теория, методология и практика» (Москва, 2014 г.); IV Международной заочной научно – практической конференции «Техника и технологии: роль в развитии современного общества» (Краснодар, 2015 г.); VII Международной заочной научно–практической конференции «Отечественная наука в эпоху изменений: постулаты прошлого и теории нового времени» (Екатеринбург, 2015 г.) XV Международной научно – практической конференции «Современные концепции научных исследований» (Москва, 2015 г.).

Публикации. По результатам исследований опубликовано 13 научных работ, 2 из которых в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК РФ, получен 1 патент.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, основных выводов, списка использованных источников из 135 наименований, приложений; изложена на 173 страницах машинописного текста, содержит 68 рисунков, 31 таблицу.

Глава 1. Состояние вопроса, цели и задачи исследований

Мелкозернистый бетон находит всё более широкое применение в дорожном строительстве - при устройстве монолитных одно- и двухслойных покрытий, оснований под усовершенствованные покрытия автомобильных дорог I-IV категорий и изготовлении различных конструкций и изделий.

Помимо особых требований по прочности при сжатии, морозостойкости и водонепроницаемости к бетону для дорожных конструкций (покрытий и оснований автодорог, аэродромов, тротуарных плит и плит мощения мостовых сооружений, бортовых камней) предъявляется прочность на растяжение при изгибе. Данный показатель качества необходимо учитывать при проектировании конструкций независимо от особенностей их эксплуатации, поскольку при работе на упругом или жестком основании он позволит обеспечить запас прочности, выносливости и трещиностойкости бетона.

К преимуществам мелкозернистого бетона можно отнести хорошую удобоукладываемость и формуемость, что важно при изготовлении тонкостенных и густоармированных конструкций. Отсутствие крупного заполнителя обеспечивает высокую однородность структуры композита, что расширяет область его применения от составов литых смесей для наливных полов до жестких смесей для вибропрессованных изделий. Широкую популярность получили сухие строительные смеси с гарантией высокого качества, возможностью легкой транспортируемости и неограниченного использования в различных условиях эксплуатации.

Однако, производственный опыт показал, что мелкозернистые бетоны по сравнению с равнопрочными по изгибу тяжелыми дорожными бетонами характеризуются в среднем более высоким содержанием портландцемента (до 10 %), в 2,5-3 раза большим содержанием песка и меньшим (примерно на 1 - 5 %) объемным весом [1], что необходимо учитывать при составлении предварительного технико-экономического обоснования их применения.

Повышенные расходы цемента и воды увеличивают усадку бетона, снижают его трещиностойкость и ухудшают деформационные характеристики [2, с. 704].

Для мелкозернистого бетона дорожных покрытий, подвергающегося воздействию агрессивной окружающей среды, существует также проблема его преждевременного разрушения вследствие недостаточной коррозионной стойкости.

Поскольку структура бетона является изотропной [3, с. 19], то способ улучшения и совершенствования его физико – механических и эксплуатационных показателей качества сводится к применению дисперсного армирования, введению высокоактивных микронаполнителей и полифункциональных химических добавок. Формирование заданной структуры и требуемых свойств цементного камня, получение долговечных модифицированных мелкозернистых бетонов и фибробетонов возможно благодаря комплексному изучению свойств исходных материалов и их взаимодействия между собой.

1.1 Особенности применения и механизм действия микрокремнезема в цементных системах

Перспективным способом повышения качества вяжущего без существенного изменения технологии производства является введение в его состав различных тонкодисперсных добавок, активно влияющих в процессе гидратации цемента на формирование структуры и свойства цементного камня. Благодаря использованию микронаполнителей появляется возможность экономить цемент, улучшать эксплуатационные качества бетонов, решать проблемы ресурсосбережения и переработки производственных отходов.

Одним из наиболее распространенных отходов промышленности является микрокремнезем, поэтому проблемы его утилизации по-прежнему актуальны. На сегодняшний день работы по проблемам применения МК в бетонах и растворах ведутся в МГСУ, НИИЖБ, ПГУПС и ряде других научных организаций. Область применения МК настолько широка, что охватывает гидротехническое и энергетическое, высотное и подземное строительство; используется при строительстве дорог, возведении зданий и сооружений ядерных установок и

других уникальных объектов.

Микрокремнезем конденсированный представляет собой пылевидный материал, состоящий из ультрадисперсных частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки печей при производстве кремнийсодержащих сплавов и поставляется в трех отпускных формах - неуплотненной, уплотненной и в виде водной суспензии. Микрокремнезем конденсированный уплотненный (МКУ) производится путем уплотнения исходного материала (МК) с помощью специального оборудования с доведением насыпной плотности до 0,28 - 0,50 т/м³.

Впервые применение микрокремнезема в технологии бетона было предложено специалистами Норвежского Технического Университета в начале 50-х годов и доказана эффективность улучшения технических свойств бетонов за счет введения в их состав тонкодисперсных отходов металлургической промышленности. Практическая значимость установлена при производстве тубингов для тоннелей в районе Осло. В составах бетонов микрокремнезем вместе с другими добавками к цементу использовался с целью повышения стойкости бетона при работе в агрессивной среде, содержащих сульфаты и слабые кислоты. Результаты исследований бетонов после 20 лет в таких условиях эксплуатации оказались положительными.

Первая техническая документация по бетону для строительных конструкций с применением МК была разработана для металлургического комбината в Фискаа (Норвегия) в 1971 г [4]. С середины 70-х годов в странах Скандинавии расширяются области применения и изучение кремнеземсодержащих добавок в бетоне. На предприятии в Готенберге (Швеция), на нескольких заводах в Норвегии и Дании организовано крупномасштабное производство бетонных смесей с МК для монолитных конструкций. Исследования в Исландии позволили наладить производство цемента с добавкой МК в количестве 7,5 % и его широкое применение в транспортном строительстве.

В США в 1983 г. приняты основные технические требования к бетону с микрокремнеземом. В Канаде с 1989 г. организовано производство бетонных

смесей с МК. С середины 80-х годов микрокремнезем стал применяться и в СССР [6]. В настоящее время в России, Казахстане и Украине заводы по производству ферросплавов и кристаллического кремния ежегодно дают около 100 - 120 тыс. тонн микрокремнезема, что составляет примерно четверть объема, улавливаемого системами газоочистки на всех аналогичных производствах в мире [7, с. 123].

Огромный вклад в технологию бетонов с микрокремнеземом внесли Баженов Ю.М., Батраков В.Г., Каприелов С.С и другие сотрудники НИИЖБа. Как добавка в бетоны и строительные растворы МК в последние годы рассмотрен во многих публикациях ученых ТГАСУ (Томск), БрГУ (Братск), СФУ (Красноярск). Последние 10-15 лет в диссертационном совете при ТГАСУ было защищено много диссертаций по МК Братского завода ферросплавов, в рамках исследования которого разрабатывались технические условия и технологические регламенты.

Требования к микрокремнезему и бетону на основе многокомпонентного вяжущего (МКВ) регламентируются нормами многих стран. По основным показателям качества требования к МК являются сопоставимыми, в том числе и российские [8; 9]. Однако Европейский стандарт EN 13263 - 1 предусматривает более строгие нормы к содержанию свободных щелочей (Na_2O ; K_2O). В работе [10, с. 14] отмечено, что в указанном стандарте предусмотрена методика определения соответствия физических и химических свойств МК (ENV 187-1). Норвежский стандарт NS 3045 допускает в составе МК минимальное количество диоксида кремния $\text{SiO}_2 = 85 \%$, а дозировка самой добавки не должна превышать 10 % от массы цемента. Стандарт Китая GB/T 18736-2002 допускает применение МК с индексом пуццолановой активности от 85 % в условиях нормального твердения в течение 28 суток. В России предъявлены требования по активности не менее 105 %, а допустимая область применения бетонов с МК для гражданского и промышленного строительства, включая системы питьевого водоснабжения, с дозировками до 30 % от массы цемента [9].

Портландцемент представлен фазами алита и белита на 75-80 %, поэтому вполне возможно считать, что эти фазы вносят наибольший вклад в формирование структуры при твердении вяжущего [11]. Изучению процессов гидратации цемента, его сроков схватывания и особенностей формирования структуры посвящено множество научных исследований [2; 5; 12 - 16]. При смешивании цементного составляющего с водой происходит гидролиз трехкальциевого силиката, а также реакции извести, содержащейся в клинкере, с водой, и при этом образуется пересыщенный раствор гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$. В первые часы идет осаждение новообразований – гидроксида кальция и этtringита. В течение суток происходит интенсивное развитие новообразований, появление гелевых оболочек и флокул цемента. В дальнейшем происходит кристаллизация гидроксида кальция, рост новообразований гидросиликата кальция и этtringита, уплотнение структуры, формирование и набор прочности цементного камня [17].

Аналогичные процессы у бетонов с МК происходят иначе. Минеральные добавки определенным образом влияют на гидратацию цемента и структурообразование цементного камня. Поскольку гидратация вяжущего – это экзотермический процесс, то состав цементного камня с микрокремнеземом будет содержать основную долю гидросиликата кальция (C-S-H), а также гидроксид кальция (CH), этtringит (AFt), моносulfат (AFm) и влиять на незначительные количества других термодинамически неустойчивых, но кинетически формирующихся новообразований (гидрогранат и т.д.) [18].

Неоднозначное влияние микрокремнезем оказывает на скорость гидратации цемента, образование и осаждение кристаллогидратов: в одних случаях он выступает в роли добавки - ускорителя гидратации цемента [19; 20]; в других, замедляя растворение алюминаткальциевых цементов, увеличивает сроки его схватывания. Различное влияние микрокремнезема на скорость гидратации цемента обусловлено доминирующей ролью примесей (SO_3 , Na_2O , CaO , K_2O , Mg_2O , C , Al_2O_3 , Fe_2O_3), которые изменяют pH среды и характер процессов

гидратообразования, и могут оказывать флокулирующее действие, ухудшая подвижность, текучесть и удобоукладываемость бетона [21; 22].

При изучении бетонов с микронаполнителем установлено [2, с. 552; 23], что высокая активность МК обусловлена присутствием диоксида кремния аморфной модификации (рис. 1.1) и свойствами тонкодисперсных частиц.

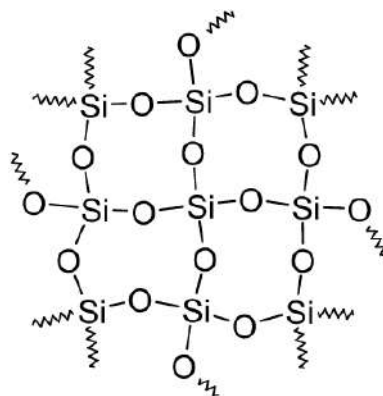


Рис. 1.1. – Пространственная структура диоксида кремния (SiO_2).

На микроуровне механизм действия МК основан на взаимодействии диоксида кремния и гидроксида кальция с образованием в результате реакции низкоосновных гидросиликатов кальция типа С-S-H (I) состава $1,7 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot (1,3 \div 1,5) \text{ H}_2\text{O}$ [14, с. 159].

Изменение гелевой и капиллярной пористости происходит из-за роста степени гидратации вяжущего, которой способствует увеличение удельной поверхности микрокремнезема и его содержания в цементном камне [24]. Микроструктурные исследования продуктов гидратации многокомпонентного вяжущего (Ц+МК) показывают, что образование С-S-H сопровождается снижением доли гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$, увеличением содержания химически связанной воды и удельной поверхности новообразований [25].

В работах [26 - 29] отмечено, что на уровне макроструктуры сферические микрочастицы МК уплотняют матрицу за счет заполнения пустот между частицами цемента и улучшают структуру гидратированных цементных паст вблизи частиц наполнителя, что приводит к уменьшению капиллярной пористости и повышению прочности контактной зоны.

Таким образом, многочисленные исследования подтверждают, что введение микрокремнезема обуславливает образование ультрадисперсной составляющей с

высокоразвитым поверхностным слоем и большим количеством срастаний на уровне новообразований, т.е. позволяет создать однородную и менее напряженную структуру цементного камня.

Использование микрокремнезема в составе вяжущего позволяет снизить расход цемента в низкомарочных тяжелых и мелкозернистых бетонах. В высокопрочных и сверхпрочных бетонах максимальное содержание минеральных добавок в составе МСВ зависит от требований, предъявляемых к бетону (защитные свойства бетона по отношению к стальной арматуре) в ряде случаев может достигать 75 % [30, п. 3.8].

В России микрокремнезем применялся на объектах:

- транспортного строительства: при сооружении Московской кольцевой автодороги, мостов и путепроводов во многих городах РФ;

- гражданского строительства: при возведении торгово-рекреационного комплекса «Охотный ряд» на Манежной площади, стадиона "Локомотив", ММДЦ «Москва-Сити» в Москве и Московской области.

- гидротехнического и энергетического строительства и ремонта: морские, речные, портовые сооружения, шлюзы Волго-Балтийского канала, подземные конструкции морского порта города Новороссийск, причалы и взлетно-посадочные полосы аэропортов С-Петербурга, Сочи, Братска и др., гидротехнические сооружения Зейской ГЭС, Волховской ГЭС, Святогорской ГЭС и др., комплекс защитных сооружений С-Петербурга от наводнений, сооружения АО «Ленэнерго», «Мосэнерго», «Карелэнерго»: дымовые трубы, градирни, насосные станции и ряде других объектов.

Полученные результаты многих исследований о влиянии микрокремнезема на свойства цементного теста, бетонной смеси и бетона, учитывая опыт его производственного применения, показали реальную возможность экономии цемента до 40% [31]. Таким образом, экономическая эффективность применения микрокремнезема достигается за счет снижения материалоемкости, повышения технологических, механических и эксплуатационных свойств бетонов и увеличения долговечности конструкций.

1.2 Особенности применения гиперпластификаторов и механизм модификации цементной матрицы

Основным недостатком мелкозернистого бетона на основе многокомпонентного вяжущего является высокая удельная поверхность, вызывающая увеличение расхода цемента и воды затворения на стадии приготовления смеси и усадку цементного камня в процессе твердения. Именно повышенные расходы цемента и воды ухудшают реологические свойства и качество затвердевшего бетона. Данные факторы наряду со свойствами применяемых материалов и параметрами режима твердения оказывают огромное влияние на влажностную, карбонизационную и контракционную усадку мелкозернистого бетона, что сказывается в конечном счете прочностных и эксплуатационных показателях качества бетонов и фибробетонов.

Применение высокоэффективных полифункциональных добавок на основе эфиров поликарбоксилатов – гиперпластификаторов (ГП) - позволяет получить высокопрочных материалов с минимальным водоцементным отношением.

Механизм действия традиционных суперпластификаторов, состоящих из продуктов конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, - электростатическое диспергирование, которое основывается на сильном смещении ζ -потенциала частиц цемента в отрицательную область. Диспергирование частиц цемента происходит в самом начале гидратации, при этом имеет место хемосорбция молекул пластификатора на поверхности частиц цемента, особенно при повышенном содержании в составе цемента фаз C_3A и C_3S [32]. При росте продуктов гидратации наблюдается резкое падение подвижности системы.

Пластификаторы нового поколения работают по несколько иному принципу: механизм их действия основан на совокупности электростатического и стерического (пространственного) эффекта, который достигается с помощью боковых гидрофобных полиэфирных цепей молекулы поликарбоксилатного эфира (рис. 1.2.1), и при этом не оказывается влияние на ζ -потенциал.

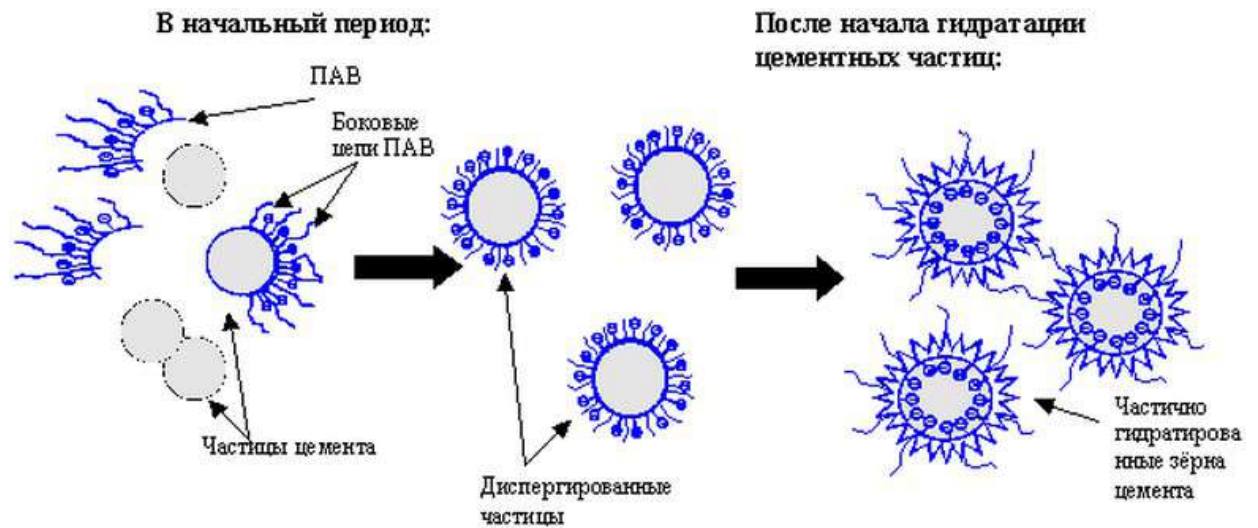


Рис. 1.2.1. - Процесс диспергирования частиц цемента.

Основными этапами механизма действия гиперпластификатора являются:

- адсорбция молекул ПАВ на поверхности твердой фазы;
- изменение электрокинетического потенциала поверхности;
- проницаемость двойного электрического поля и адсорбционной оболочки молекулами воды и продуктами растворения твердой фазы;
- изменение толщины слоя воды на поверхности твердого тела.

При покрытии поверхности зерен цемента монослоем прочность и энергия связи между ними резко понижаются. Адсорбируясь, поверхностно-активные вещества размещают частицы на расстоянии двух молекулярных слоев. Введение добавки на ранних стадиях взаимодействия цемента с водой диспергирует цементные агрегаты и затрудняет их последующую коагуляцию в крупные флоккулы. При этом высвобождаемая вода механически удерживается в порах структуры.

При действии молекул гиперпластификатора в цементных растворах начинают протекать следующие противоположные процессы:

- образование адсорбционных слоев предотвращает агрегирование цементных систем, замедляет процессы гидратации и структурообразования;
- за счет диспергации увеличивается число мельчайших частиц, что приводит к их более интенсивному срастанию, ускорению гидратации, а также увеличивает седиментационную устойчивость цементной системы.

Гиперпластификаторы на первых стадиях гидратации замедляют образование этtringита. С понижением активности вяжущего и с увеличением концентрации добавки структурообразование так же замедляется. Однако, в составах с низким В/Ц капиллярная пористость и средний радиус пор значительно уменьшаются, вследствие чего формируется плотная структура цементного камня с улучшенными физико-механическими свойствами. Механизм пластификации смеси дополняется вытеснением из адсорбционных слоев молекулами пластификатора связанной воды.

В малоподвижных и жестких бетонных смесях может возникать дефицит жидкой фазы, приводящий к замедлению гидратационных процессов и, вследствие этого, к появлению напряжений в неоднородной структуре модифицированного цементного камня при циклических воздействиях. Применение гиперпластификатора в комплексе с микрокремнеземом позволяет максимально реализовать потенциал обеих групп добавок, а также получить значительный экономический и экологический эффект за счет снижения расхода цемента и увеличения долговечности бетона при одновременной утилизации побочных продуктов промышленности.

В работах [33; 34] отмечено, что с повышением содержания сульфатов и алюминатов в клинкере значительно уменьшается сохраняемость подвижности цементных систем с ГП. Возникает необходимость направленной оптимизации химической структуры поликарбоксилатов, которая будет способствовать уменьшению чувствительности к минералогическому составу цемента. Поликарбоксилаты также склонны к незначительному воздухововлечению, что естественно положительно отражается на морозостойкости бетонов.

В зависимости от условий синтеза получают поликарбоксилаты с различными длинами боковых полиэфирных цепочек. Это позволяет создавать материалы с разным соотношением стерического эффекта и анионной активности для достижения требуемой водоредуцирующей способности добавок [35]. Особую роль поликарбоксилатные добавки приобрели при изготовлении самоуплотняющихся и самонивелирующихся бетонных смесей, реактивных

порошковых бетонов, которые открывают новый весьма перспективный этап в технологии бетонов [36].

Особенно эффективен может быть гиперпластификатор при использовании в качестве модификатора в мелкозернистых бетонах с синтетической фиброй как в начальный период набора, так и в конечный.

1.3 Особенности применения микроволокон для дисперсного армирования бетонов

В настоящее время весьма актуальны исследования влияний разных видов фибры на механические и эксплуатационные свойства дисперсно-армированных бетонов. Дисперсное армирование позволяет модифицировать бетон на микро- и макроуровнях и таким образом улучшает его требуемые показатели качества.

На пути решения целого комплекса задач вопрос разработки современных способов проектирования, приготовления и укладки смеси и прогнозирования прочностных и эксплуатационных свойств фибробетонов является ключевым.

Обеспечение заданных показателей качества фибробетонов возможно только благодаря рациональному выбору типов волокон, определению их оптимальной дозировки и правильному приготовлению смеси. Область применения волокон разных типов и их эффективного использования для дисперсного армирования регламентируются всего лишь двумя международными стандартами - EN14489 и ASTM C 116-03.

Американский стандарт ASTM C 116 - 03 определяет 3 общих класса армированного бетона:

- 1 – армированный стальными волокнами бетон или торкретбетон;
- 2 – армированный стекловолокном бетон или торкретбетон;
- 3 – армированный полимерными волокнами бетон или торкретбетон.

Британский (европейский) стандарт BS EN 14489 разделяет полимерные волокна на два основных класса в зависимости от их размеров:

- Класс I: микроволокна;
- Класс I a: микроволокна <0,3 мм в диаметре, монофиламентные;

- Класс I b: микроволокна $< 0,3$ мм в диаметре, фибриллированные;
- Класс II: макроволокна $> 0,3$ мм в диаметре.

В данных нормативах отмечено, что волокна с диаметром более 0,3 мм следует применять в конструкциях, к которым предъявляются высокие требования по прочности на растяжение при изгибе. Таким образом, выбирая различные типы волокон, корректируя их расход и контролируя процесс приготовления смеси, возможно направленно регулировать свойства композита, повышая его прочностные характеристики. Дисперсное армирование позволит снизить концентрацию напряжений, предотвратит развитие микро- и макротрещин и повысит трещиностойкость фибробетона.

В отечественной индустрии фибробетон (в основном со стальными волокнами) успешно зарекомендовал себя в мостовых конструкциях и в полах промышленных складов и заводов, подверженных повышенным динамическим нагрузкам и эксплуатационным воздействиям. По данным НИИЖБа [39], технология производства и возведения сталефибробетонных конструкций и сооружений достаточно отработана и не вызывает серьезных затруднений при использовании серийного оборудования, применяемого для железобетона.

Батраков В.Г. [2, с. 715] отмечает, что сталефибробетон имеет заданную прочность в 3...10 раз более высокую, чем рядовой бетон того же состава, но без добавки фибры, его сопротивление термическому воздействию выше в 3...7 раз, он более морозостоек, сопротивление истиранию и прочность на растяжение при изгибе выше в 2 раза.

Несмотря на очевидные преимущества сталефибробетона, наряду с высокой плотностью и связностью фибробетонной смеси Пухаренко Ю.В. [40] выявляет ряд важных проблем:

- дефицитность и высокая стоимость стальных фибр малых диаметров, изготавливаемых резкой стальной проволоки;
- сравнительно низкая степень насыщения бетонных матриц фибрами такого типа, что ограничивает дальнейшее улучшение физико – механических и эксплуатационных свойств сталефибробетона;

- необходимость перевооружения бетоносмесительных узлов предприятий сборного железобетона в связи с малой технологичностью фибр из проволоки.

Также известно, что бетонирование элементов мостов, гидротехнических сооружений и других крупногабаритных конструкций гражданских и промышленных объектов осуществляется при помощи автобетононасосов, и, как показывает практика, перекачка сталефибробетонов по бетоноводам является технологически очень сложной. В процессе подачи возникает ряд серьезных проблем - расслоение фибробетонной смеси, образование пробок из щебня, гидравлические удары и ускоренный износ подающих поршней и гильз «ежами» из фибры, – что приводит к досрочному выходу из строя оборудования и дорогостоящему ремонту [41, с. 79].

С точки зрения технологии строительства проблема перекачки фибробетонной смеси является ключевой, хотя данные вопросы практически не имеют теоретического решения и не затрагиваются в производственных кругах. А между тем, высокие требования к качеству бетонной смеси являются гарантией надежной эксплуатации автобетононасосов [42]. В связи с этим возникает проблема тщательного производственного контроля за соответствием заданным характеристикам бетонной смеси с металлической фиброй, поступающей на строительную площадку.

В целях повышения долговечности и уменьшения дефективности расчет фибробетонных и железобетонных конструкций, подверженных воздействию агрессивных сред (прямому воздействию щелочей) и повышенным динамическим нагрузкам, следует выполнять с учетом категории трещиностойкости и предельно допустимой ширины раскрытия трещин в бетоне [43, п. 5.4.11]. Учитывая данные факторы, применение металлической фибры в ответственных конструкциях сооружений может быть ограничено ввиду ее слабой коррозионной стойкости.

Альтернативным вариантом могут послужить минеральные и химические волокна, обладающие уникальными физико – химическими и эксплуатационными свойствами. Наибольшее распространение получили

стеклянные, базальтовые и полиолефиновые волокна ввиду доступности и приемлемой цены. Основные свойства и показатели неметаллических волокон представлены в таблице 1.3.1.

Таблица 1.3.1

Основные свойства неметаллических волокон

Физико – механические свойства	Базальтовая фибра	Стекловолоконная фибра	Полипропиленовая фибра
Плотность, кг/м ³	2600-2700	2600	910
Термостойкость, °С	700	730-1670	165
Модуль упругости, МПа	7100-11000	7000-8000	3500-8000
Прочность при растяжении, МПа	1600-3600	1050-3850	170-770
Цена, руб./кг	от 160	от 150	от 145

Данные виды волокон имеют в сравнении друг с другом как важные преимущества, так и серьезные недостатки.

Свойства стекловолокон зависят от множества факторов, в том числе от способов их получения и химического состава исходного материала. Стекловолокно получают из расплава стекла специального химического состава. Экструзия производится путем продавливания расплава через прядильные фильеры. Исходный продукт получается в виде бесконечных элементарных волокон (филаментов), из которых в процессе переработки формируются комплексные нити (диаметром 3—100 мкм и линейной плотностью до 0,1 Текс) или стеклянные ровинги (с линейной плотностью более 100 Текс).

По своему химическому составу промышленные стекла и стекловолокна делятся на две группы:

- бесщелочные (содержание не более 1 – 2 % щелочных оксидов);
- щелочные (содержание 10 – 15 % щелочных оксидов).

Определено, что стеклянные нити диаметром до 10 мкм по прочности соответствуют высокоуглеродистой холоднотянутой проволоке, при этом легче ее в 3,5 раза. Наряду с высоким модулем упругости на первый взгляд рассматриваются большие перспективы их применения.

Однако, основной причиной, сдерживающей использование стеклянных

волокон в качестве армирующего материала для бетонных матриц, является их сравнительно низкая устойчивость к воздействиям среды гидратирующихся цементов. Опыты доказывают, что все без исключения силикатные стекла независимо от их химического состава активно вступают во взаимодействие с раствором $\text{Ca}(\text{OH})_2$, поглощая из него CaO [44; 45; 46]. Поэтому проблема оптимизации химического состава стекловолокна и увеличения его щелочестойкости остается по-прежнему актуальной.

Базальтовую фибру получают из расплавов базальтовых горных пород. Производство непрерывного базальтового волокна, также как и стеклянного, основано на вытягивании расплавленного базальта через фильеры плавильного оборудования с последующей переработкой в ровинг. Основная масса исходного материала сложена микролитами плагиоклазов, клинопироксена, магнетита или титаномагнетита, а также вулканическим стеклом. Наиболее распространенным акцессорным минералом является апатит.

Несмотря на рекомендации заводов – изготовителей и заявленные уникальные свойства базальтовой фибры, базальтофибробетон также имеет ограниченное применение в конструкциях, работающих в условиях агрессивных сред, по следующим причинам:

- невысокая щелочестойкость, обусловленная химическим составом исходного материала, близким к составам многих стеклянных волокон [47; 48; 49; 50; 51];

- более интенсивная потеря веса после 3-х часового кипячения в сильных окислителях (до 3-х % по массе) по сравнению со стеклянными волокнами [52; 53];

- наличие наноразмерных дефектов поверхности и объема базальтовых волокон, вызванные наличием алюмосиликатных кластеров от 1 до 30 нм [54].

Неудобства при работе с базальтовым ровингом представляет применение средств индивидуальной защиты, необходимое для избежания раздражающего действия на кожу рук [55].

Широкое применение благодаря импортозамещению и расширению производства находят полиолефиновые (синтетические) волокна, получаемые из изотактического полипропилена и полиэтилена. Формуются из расплавов полимеров методом экструзии; выпускают в виде комплексных нитей, мононитей, нитей из ориентировочной пленки (плоской и фибриллированной) и ровинга. Ориентационное вытягивание сформованных волокон (в 5-10 раз) осуществляют на обогреваемой металлической поверхности или в воздушной среде при температуре на 20-30 °С ниже температуры плавления полимера.

Для повышения устойчивости волокон при нагревании и УФ облучения в полиолефины на стадии их синтеза или грануляции вводят стабилизаторы (фенолы, ароматические амины, аминафенолы и т.д.). Большинство синтетических волокон гидрофобны, устойчивы к кислотам и щелочам. Не растворяются в неполярных органических растворителях (бензол, толуол, декалин, тетралин) ввиду высокой кристалличности полиолефинов при комнатной температуре, но с повышением температуры набухают, а затем растворяются.

В зависимости от типа и соотношения присутствующих стереоизомеров свойства полиолефинов изменяются в широком диапазоне. Решающее влияние на технические характеристики полипропилена и изделий из него оказывает молекулярная и надмолекулярная структура полимерной цепи.

Полипропилен получают путем полимеризации пропилена (рис. 1.3.1) в присутствии металлокомплексных катализаторов [56, с. 177]:

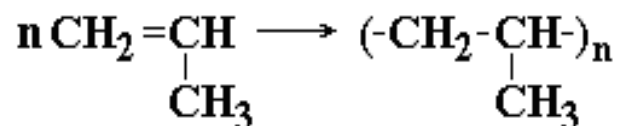


Рис. 1.3.1 – Реакция полимеризации полипропилена.

Полипропилен характеризуется более сложной молекулярной структурой, чем большинство производимых промышленностью полимеров, так как, помимо химического состава мономера, на его структуру оказывает влияние пространственное расположение боковых групп по отношению к главной цепи.

В зависимости от условий проведения реакции получают типы фракций полипропилена с различными физико – механическими характеристиками,

определяющие области применения материала. Так для изготовления волокон используется полипропилен, состоящий из изотактической (95–98 %) и атактической (5–2 %) фракций. Пространственные структуры фракций полипропилена представлены на рисунке 1.3.2 [57].

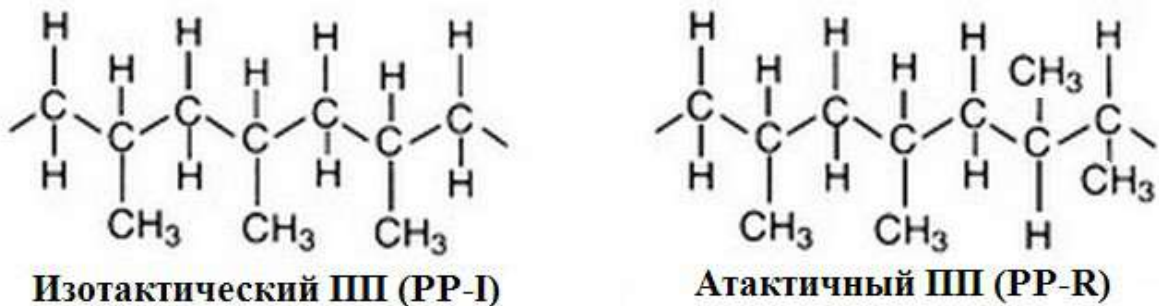


Рис. 1.3.2 – Пространственные структуры фракций полипропилена.

При исследовании рентгеновскими лучами доказано, что атактические участки, обладающие большей пластической деформативностью по сравнению с изотактическими, вызывают нарушения в кристаллической решетке и тем самым ухудшают свойства полипропилена [58]. Поэтому в техническом отношении наиболее важен и перспективен изотактический полипропилен.

С уменьшением молекулярного веса снижаются показатели предела прочности полипропилена при растяжении, относительное удлинение при разрыве, ударная вязкость при изгибе и растяжении.

Широкое распространение среди синтетических волокон получила полипропиленовая фибра, однако ее область применения ограничивается штукатурными растворами и подстилающими слоями под полы в качестве эффективной добавки для снижения усадки.

Номенклатура полипропиленовой фибры представлена двумя типами волокон:

- мультифиламентное – длина $1,5 \div 45$ мм, диаметр 20-30 мкм (рис. 1.3.3);
- фибриллированное – длина $18 \div 50$ мм, диаметр 30-780 мкм (рис. 1.3.4).

Фибриллированная полипропиленовая фибра не находит широкого применения, так как наиболее эффективна в конструкциях, к которым предъявляются особые требования по прочности на растяжение при изгибе. Механическая анкеровка таких волокон в цементном камне более эффективна благодаря волнистой

форме и большим геометрическим размерам (длина 18 - 50 мм, диаметр 30 - 780 мкм).

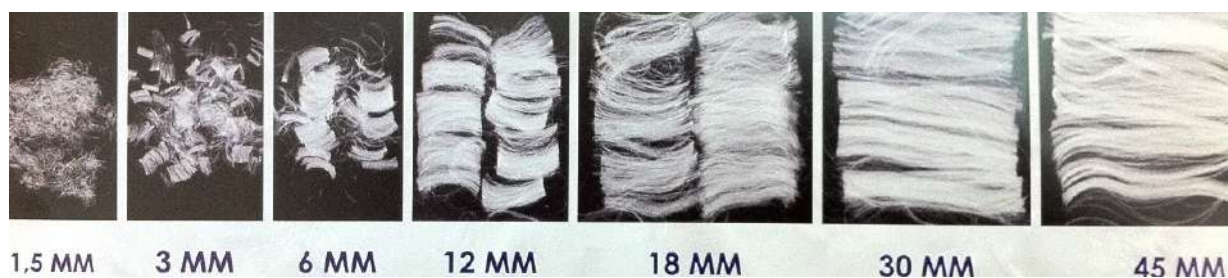


Рис. 1.3.3 – Виды мультифиламентной полипропиленовой фибры

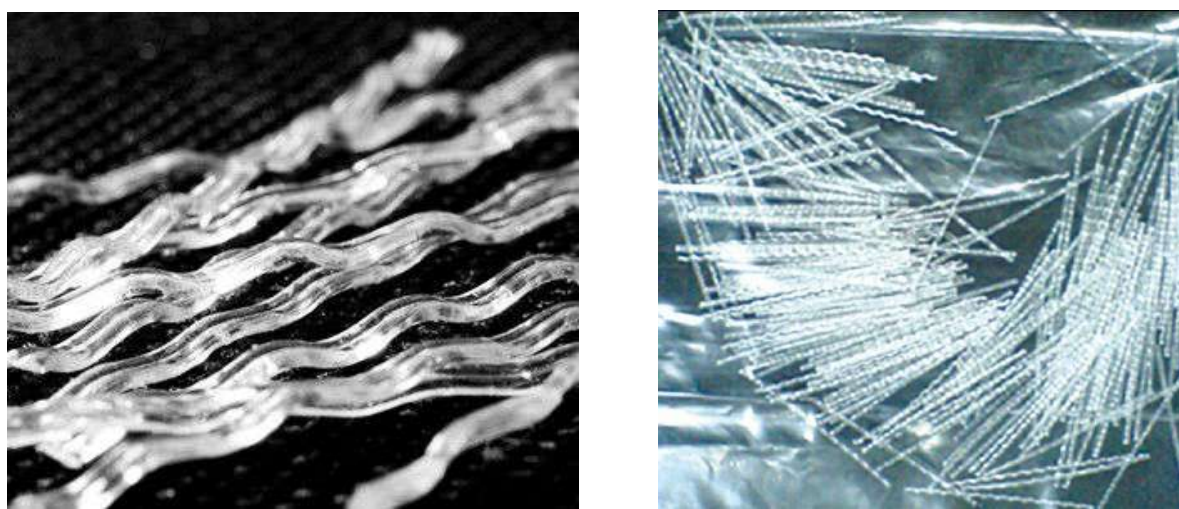


Рис. 1.3.4 – Виды фибриллированной полипропиленовой фибры

Учитывая отсутствие отечественных стандартов, накопленной научно - исследовательской базы и опыта производственного использования полипропиленовой фибры, нельзя говорить о нецелесообразности ее применения в ответственных конструкциях. Несмотря на низкие показатели модуля упругости и прочности при растяжении в сравнении с другими волокнами, полипропиленовая фибра химически инертна в среде гидратирующего цемента и по отношению ко многим кислотам и растворителям. К деструкции полипропилена может привести только длительный контакт с сильными окислителями при температуре более 60 °С.

Именно особые химические свойства полипропилена позволяют повысить коррозионную стойкость дисперсно – армированного бетона, особенно при длительной работе в сложных эксплуатационных условиях.

Многочисленные исследования [59 - 65] показывают, что применение синтетических волокон в качестве армирующего материала обычно приводит к

уменьшению усадочных деформаций хрупкой цементной матрицы, повышению морозостойкости, истиранию, атмосферостойкости и значительному увеличению прочностных характеристик и показателей вязкости разрушения бетонов на всех структурных уровнях.

Однако известно, что вредное влияние на механические свойства полипропилена оказывает ультрафиолетовая часть спектра солнечного света с диапазоном волн 280 - 400 нм. При дополнительном действии кислорода полипропилен подвергается фотохимической деструкции, поэтому его необходимо стабилизировать. Ввиду данных особенностей появляется необходимость принятия мер по защите бетонов при эксплуатации в средах с избыточным содержанием кислорода и постоянному воздействию солнечных лучей.

Несмотря на восприимчивость полипропилена к воздействию ультрафиолетовых лучей, условия работы и возраст не влияют на ударную вязкость композита [66], следовательно, полипропиленовая фибра может значительно повысить долговечность фибробетона.

Учитывая особые физико – химические свойства полипропилена, весьма актуальными будут исследования механических и эксплуатационных показателей качества модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй и изготовление из них ответственных дорожных конструкций и изделий.

1.4 Опыт применения фибробетонов в России и за рубежом

Основываясь на результатах анализа развития и совершенствования бетонов, следует отметить, что фибробетон является одним из перспективных строительных материалов XXI-го века. История развития фибробетона насчитывает уже полтора столетия.

В 1874 году английский строитель А. Берард запатентовал добавку к бетону, представляющую собой неоднородную смесь различных материалов. В 1918 году французский ученый Х. Альфсен изобрел метод армирования при помощи стальных или деревянных волокон.

В нашей стране работы, посвященные разработке дисперсно–армированных бетонов и растворов, ассоциируют с именем русского инженера В.П. Некрасова, который в 1909 году первым получил патент на фибробетонную конструкцию.

Широкое развитие исследования по разработке фибробетонов и методов расчета конструкций из них получили с 60-х годов XX-го века. На мировом рынке стальные волокна как материал для промышленного армирования появились в 1973 году. С тех пор проведено значительное количество международных научно-технических конференций и семинаров, посвященных результатам научных исследований и практическому применению фибробетонов в строительстве.

Глобальные исследования в области технологии и изучения свойств сталефибробетона начинались в НИИЖБ (Москва) в середине 70–х гг. XX века. В то же время они проводились в ЛенЗНИИЭП (Ленинград), а позже и в ЛатНИИС. Работы по дисперсному армированию проводили ОАО «ЦНИИПромзданий», Ростовский Водоканалпроект, Карагандинский Промстройпроект, ВНИИ-Строммаш, НИИЦемент, Киевский Политехнический институт, МИСИ (МГСУ) им. В.В. Куйбышева, МХТИ (МГХТУ) им. Д.И. Менделеева, ЛИСИ (ГАСУ). Благодаря Постановлению Совмина СССР «О некоторых мерах по повышению технического уровня производства железобетонных конструкций и более эффективному использованию в строительстве» строители получили базу для внедрения дисперсно–армирующих волокон в качестве упрочняющей добавки для бетона. В дальнейшем это позволило говорить о создании нового высокопрочного материала — фибробетона. Первое широкое применение фибробетона в СССР датируется 1976 годом, когда его впервые использовали при строительстве взлетно-посадочной полосы.

Первым нормативным документом в области проектирования конструкций из дисперсно – армированных бетонов стал СНиП 2.03.03–85 «Армоцементные конструкции», разработанный НИИЖБ и ЛенЗНИИЭП в 1984 г.

В 1996 году был впервые разработан ГОСТ Р 50862-96, в котором были сформулированы требования к конструкциям и их классы по устойчивости к

взлому (взломоустойчивости), методы ее определения. Как показывал международный опыт, наиболее эффективными, с учетом стоимости, зарекомендовали себя защитные банковские сооружения из сталефибробетона. В лабораториях НИИЖБа были проведены исследования и разработаны составы сталефибробетона для защитных ограждающих конструкций различного класса взломоустойчивости с соответствующей сертификацией качества.

В 1997 году был принят ВСН 56-97, который распространялся на проектирование элементов несущих и ограждающих конструкций и изделий из стеклофибробетона для зданий и сооружений различного назначения. Стеклофибробетон выгодно отличался от сталефибробетона удачным сочетанием в материале эксплуатационных, конструкционных и технологических свойств. Данный стандарт предполагает использование и других видов фибры: полипропиленовой, нейлоновой, полиэфирной, полиамидной, акриловой, полиэтиленовой и других.

Изучение дисперсно-армированных бетонов с синтетическими волокнами и разработка стандартов на них ведутся медленными темпами по причине нежелания производителей уходить от традиционных технологий, а также дефицита и высокой стоимости волокон, что тормозит внедрение и расширение областей применения таких фибробетонов.

Между тем в 2013 году исполнилось 30 лет с того момента, как полипропиленовые волокна (ППВ) для дисперсного армирования бетона стали широко использоваться во всем мире. Впервые в США ППВ были использованы в защитных оболочках свай. На данный момент около 10% всего товарного бетона, используемого в Америке, содержит полипропиленовую фибру, а в Великобритании уложены миллионы кубометров конструкционного фибробетона для морских укреплений, мостов и водохранилищ, а также в сборном бетоне и торкретбетоне.

Уже более 20 лет полипропиленовая фибра используется в транспортном строительстве, дорожных и мостовых конструкциях Северной Америки и Европы. Более 16 лет независимого тестирования по всему миру показали, что

ППВ в количестве 0,1% по объему обеспечивает устойчивость к растрескиванию при пластической усадке, истиранию, циклам замораживания - оттаивания, сопротивлению удару, а также огнестойкость, прочность, антимикробную защиту и пониженную проницаемость.

В Российской Федерации все разработки и исследования дисперсно-армированных бетонов с синтетическими волокнами на сегодняшний день основаны лишь на фундаментальных знаниях, которые получены в результате изучения технологических процессов изготовления, расчетов и проектирования конструкций из стале- и стеклофибробетона.

Огромный вклад в развитие теории и технологии бетонов внесли: Гвоздев А.А., Баженов Ю.М., Батраков В.Г., Байков В.Н., Берг О.Я., Алимов Л.А., Воронин В.В., Горчаков Г.И., Лесовик В.С., Бондаренко В.М., Зайцев Ю.В., Крылов Б.А., Каприелов С.С., Михайлов К.В., Носарев А.В., Ратинов В.Б., Скрамтаев Б.Г., Холмянский М.М., Шейкин А.Е., Фаликман В.Р., Несветаев Г.В., Белов В.В., Хозин В.Г., Шестоперов С.В., Соболев Г.М. и другие.

Непосредственным изучением дисперсного армирования бетонов занимались следующие ученые: Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Рабинович Ф.Н., Лезов В.Ю., Моргун Л.В., Соболев К.Г., Бочарников А.С., Волков И.В., Гулимова Е.В., Кобацкий А.В., Крылов Б.А., Курбатов Л.Г., Лобанов И.А., Малышев В.Ф., Романов В.П., Янкелович Ф.Ц., Шикунов Г.А., Хайдуков Г.К., Малинина Л.А., Королев К.М., Гофштейн Ф.А., Бердичевский Г.И., Кутухтин Е.Г., Михайлов К.В., Хромец Ю.Н., Родов Г.С., Лейкин Б.В., Данилова С.Г., Мелихова Е.А., Крылов Б.А., Рыбасов В.П., Вылегжанин В.П., Талантова К.В., Ваучский М.Н., Кравинский В.К., и другие.

Актуальность продолжения исследований модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй в настоящее время является очевидной. Дисперсное армирование позволит уменьшить количество рабочей арматуры в конструкциях и изделиях, а в некоторых случаях и полностью заменить ее. Разработка и глубокое изучение высококачественных модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

позволит решить проблемы эксплуатационной надежности и долговечности ответственных дорожных и мостовых конструкций, а также элементов гидротехнических сооружений.

С учетом изложенного, целью диссертационной работы является получение теоретических данных и разработка практических основ проектирования и производства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй.

Для достижения главной цели работы необходимо выполнить следующие задачи:

- исследовать свойства компонентов смеси и особенности их применения;
- исследовать механизмы взаимодействия и совместного влияния микронаполнителя, химической добавки и дисперсного армирования на технологические, прочностные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов;
- разработка методик подбора составов и улучшение технологии изготовления модифицированного мелкозернистого фибробетона с заданными показателями качества;
- произвести оптимизацию составов и получить математические уравнения для прогнозирования свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй;
- разработать рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций;
- выполнить апробацию разработанных составов, испытать выпущенные изделия и произвести оценку их технико-экономической эффективности.

Глава 2. Применяемые материалы и методы исследований

2.1 Применяемые материалы

2.1.1 Цемент

В исследованиях применялся портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (активность 42,5 МПа, нормально твердеющий), в соответствии с ГОСТ 31108 – 2003 «Цементы общестроительные. Технические условия» и ГОСТ 30515 – 97 «Цементы. Общие технические условия», произведенный ЗАО «Белгородский цемент», г. Белгород. Химико – минералогический состав портландцемента и его физико – механические свойства представлены в таблицах 2.1.1.1 и 2.1.1.1.

Таблица 2.1.1.1

Химико – минералогический состав портландцемента ЦЕМ I 42,5Н

Содержание компонентов, % по массе									
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	$\frac{CaO}{SiO_2}$	R ₂ O	MgO	Cl ⁻ ион	п.п.п.	нераств. осадок
61,5 ± 2,0	15,9 ± 2,5	7,0 ± 0,5	13,0 ± 0,5	3,05	0,6	0,58	0,03	1,7	0,14

Таблица 2.1.1.2

Физико – механические свойства портландцемента ЦЕМ I 42,5Н

Показатель	Единица измерения	Величина
Предел прочности при сжатии в возрасте 28 суток	МПа	61,0 ± 0,5
Сроки схватывания: начало схватывания	сек	145 ± 35
конец схватывания		205 ± 40
Удельная поверхность	м ² /кг	330 ± 30
Истинная плотность	кг/м ³	3101
Тонкость помола, проход через сито № 008	%	91,5 ± 1,5
Нормальная густота цементного теста	%	25,25 ± 0,25
Содержание оксида серы SO ₃	%	2,40 ± 0,35
Ложное схватывание	-	отсутствует
Удельная эффективная активность	Бк/кг	55 ± 7

2.1.2 Песок

В исследованиях использовался крупный природный песок 1 класса, соответствующий ГОСТ 8736 – 93* «Песок для строительных работ. Технические условия», ОАО «Хромцовский карьер», с. Хромцово, Ивановской области.

Технологические свойства и гранулометрический состав песка Хромцовского карьера представлены в таблицах 2.1.2.1 и 2.1.2.2. Химический состав песка и содержание в нем вредных примесей приведены в таблицах 2.1.2.3 и 2.1.2.4.

Таблица 2.1.2.1

Технологические свойства песка Хромцовского карьера

Показатель	Единица измерения	Величина
Насыпная плотность, $\rho_{\text{нас}}$	кг/м ³	1620,0
Истинная плотность, $\rho_{\text{ист}}$	кг/м ³	2626,0
Пустотность, П	%	38,3
Водопотребность, $V_{\text{п}}$	%	6,0
Модуль крупности, $M_{\text{к}}$	-	2,73
Потеря массы при прокаливании	%	5,85
Удельная эффективная активность	Бк/кг	33 ± 5

Таблица 2.1.2.2

Гранулометрический состав песка Хромцовского карьера

Остатки на ситах	Гр5	Размеры ячеек, мм					Прошло через сито 0,14	Σ
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,14		
Частные, г	2,73	124	119	287	324	125	21	1000
Частные, %		12,4	11,9	28,7	32,4	12,5	2,1	100
Полные, %		12,4	24,3	53,0	85,4	97,9	100	

Таблица 2.1.2.3

Химический состав песка Хромцовского карьера

Содержание компонентов, % по массе											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SiO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	ппп	Гигроск. вода	Несвяз SiO ₂
76,7	6,31	1,65	0,26	7,61	1,69	0,06	1,03	1,34	3,35	0,22	61,56

Таблица 2.1.2.4

Содержание вредных примесей в песке Хромцовского карьера

Контролируемый параметр	Показатель
Сульфаты и сульфиты в перерасчете на SO ₃ , %	0,5
Аморфные разновидности SO ₂ , моль/л	30
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	1,5
Содержание глины в комках, %	отсутствует

2.1.3 Добавка

В качестве полифункциональной добавки согласно ГОСТ 24211 – 91 «Добавки для бетонов. Общие технические требования» применялся гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, произведенный в соответствии с EN 934 – 2: 2001 ЗАО «Стахема-Волга», г. Тольятти. Гиперпластификатор представляет собой жидкую добавку на основе поликарбоксилатов и замедлителя. В ее состав входят: вода – 70%, поликарбоксилатер – 18%, глюконат натриевый – 12%. Плотность добавки составляет 1097 ± 10 кг/м³, массовая доля сухого вещества в водном растворе $30 \pm 1,5\%$, водородный показатель $pH = 5 \div 8$. Зависимость плотности добавки от температуры представлена в таблице 2.1.3.1.

Таблица 2.1.3.1

Зависимость плотности добавки от температуры

Температура, С ⁰	5	10	15	20	25	30	35
Плотность ρ_d , кг/м ³	1102	1100	1099	1097	1095	1093	1091

2.1.4 Микрокремнезем

В качестве высокоактивной минеральной добавки был использован микрокремнезем конденсированный уплотненный МКУ-85, изготовленный по ТУ 5743 – 048 – 02495332 – 96 ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк.

Микрокремнезем конденсированный представляет собой ультрадисперсный материал, состоящий из частиц сферической формы, получаемый в процессе газоочистки печей при производстве кремнийсодержащих сплавов ферросилиция марок ФС 75 и ФС 90. Преобладающий размер частиц микрокремнезема от 1 до 0,01 мкм и менее. Основным компонентом материала является диоксид кремния аморфной модификации. Рентгеноструктурным анализом установлено наличие в микрокремнеземе оксида кремния в виде коусита – SiO, что придает ему высокую химическую активность в водных средах. Микрокремнезем конденсированный пожаровзрывобезопасен, вещество не радиоактивное, умеренно опасное: 3-й класс опасности по ГОСТ 12.1.007, ПДК в воздухе рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005- 1 мг/м³.

Физико – химические свойства, фракционный, гранулометрический и химический составы микрокремнезема МКУ-85 приведены соответственно в таблицах 2.1.4.1, 2.1.4.2, 2.1.4.3 и 2.1.4.4.

Таблица 2.1.4.1

Физико – химические свойства микрокремнезема МКУ-85

Показатель	Единица измерения	Величина
Насыпная плотность, $\rho_{\text{нас}}$	кг/м ³	400 – 600
Истинная плотность, $\rho_{\text{ист}}$	кг/м ³	2200
Удельная поверхность по адсорбции азота	м ² /Г	18...22
Удельная поверхность по адсорбции ртути	м ² /Г	24...25
Водопотребность, $V_{\text{п}}$	%	85
Средний размер частиц	мкм	0,25
Потеря массы при прокаливании	%	1,6
Массовая доля влаги	%	0,3
Удельная эффективная активность	Бк/кг	59,01 ± 9,0

Таблица 2.1.4.2

Фракционный состав микрокремнезема МКУ-85

Фракция, мкм	Содержание, %	Фракция, мкм	Содержание, %
48,3...20,0	1,60	5,4...3,4	1,37
20,0...15,3	1,00	3,4...2,36	0,88
15,3...8,3	2,66	2,36...1,98	1,01
8,3...5,4	1,41	< 1,98	90,07

Таблица 2.1.4.3

Гранулометрический состав микрокремнезема МКУ-85

Наименование остатка	Остатки, % по массе на ситах				Прошло через сито № 0,14
	< 0,5 мм	0,5 -1,6 мм	1,6 -5 мм	5 мм	
Полный	90,3	1,6	8,1	0	-

Таблица 2.1.4.4

Химический состав микрокремнезема МКУ-85

Содержание компонентов, %									
SiO ₂	H ₂ O	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	CaO	SiO ₃	Fe ₂ O ₃	ППП
93,8	0,1	0,81	0,68	1,6	0,44	0,41	0,41	1,3	0,45

Данные таблицы 2.1.4.4 позволяют определить показатели следующих модулей, характеризующих основность, кислотность и активность микрокремнезема:

$$1. \text{ Модуль основности: } M_o = \frac{\omega(\text{CaO}) + \omega(\text{MgO})}{\omega(\text{SiO}_2) + \omega(\text{Al}_2\text{O}_3)} = \frac{0,41 + 0,81}{93,8 + 0,44} = 0,013 \quad (2.1.4.1)$$

где ω – содержание соответствующего оксида в % по массе.

$M_o = 0,013 < 1$ - микрокремнезем относится к кислым материалам.

$$2. \text{ Модуль кислотности: } M_k = \frac{\omega(\text{SiO}_2) + \omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{\omega(\text{CaO}) + \omega(\text{MgO})} = \frac{93,8 + 0,44}{0,41 + 0,81} = 77,246 \quad (2.1.4.2)$$

$M_k = 77,246 \gg 1$ - микрокремнезем относится к сверхкислым материалам.

$$3. \text{ Модуль активности: } M_A = \frac{\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)}{\omega(\text{SiO}_2)} = \frac{0,44}{93,8} = 0,005 \quad (2.1.4.3)$$

$M_A = 0,005 < 1$ - микрокремнезем не относится к активным материалам.

2.1.5 Фибра

В качестве волокон для дисперсного микроармирования применялось мультифиламентное полипропиленовое фиброволокно из изотактического полипропилена, изготовленное по ТУ 2272 – 001 – 90345062 – 2012 ООО «ФибраЛюкс», Ленинградская область, г. Коммунар. Физико – механические и химические свойства полипропиленовой фибры представлены соответственно в таблицах 2.1.5.2 и 2.1.5.2.

Таблица 2.1.5.1

Физико – механические свойства полипропиленовой фибры

Наименование свойства	Значение
Длина, мм	6 - 18
Диаметр, мкм	19-20
Форма сечения	круглая
Частотность волокна, млн. шт./кг	225
Плотность, кг/м ³	910
Теплопроводность, Вт/м*°С	0,23
Удельная теплоемкость, Дж/кг*°С	1,73
Температура размягчения / воспламенения, °С	165/>320
Относительное удлинение при разрыве, %	250
Площадь поверхности волокон, м ² /кг	220-240
Кoeff. линейного теплового расширения, °С ⁻¹	1,1·10 ⁻⁴

Ударная вязкость, кДж/м ²	25-40
Теплостойкость по Мартенсу, °С	120
Твердость по Бринеллю, кгс/мм ²	6,0—6,5
Модуль упругости, МПа	3500-3900
Прочность на растяжение, МПа	240
Стойкость к УФ - лучам	чувствителен

Таблица 2.1.5.2

Химические свойства полипропиленовой фибры

Наименование свойства	Значение
Материал	Полипропилен (C ₃ H ₆)
Химическая стойкость к щелочной среде и органическим растворителям	Высокая
Поверхность	Обработана для улучшения распределения и сцепления
Тип замасливателя	4С (водосовместимый силан)
Массовая доля замасливателя	Не менее 0,3%
Химическая стойкость к кислотам, в т.ч. концентрированным	разрушается в хлорсульфоновой кислоте SO ₂ Cl(OH), в серной H ₂ SO _{4(к)} , в соляной HCl _(к)

2.1.6 Вода

Для приготовления бетонных и фибробетонных смесей применялась водопроводная вода, соответствующая ГОСТ 23732 – 2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия». Источник воды – река Волга. Химический состав и физические свойства воды представлены в таблице 2.1.6.1.

Таблица 2.1.6.1

Химический состав и физические свойства водопроводной воды

Химический состав		Физические свойства	
Показатели	Значение	Показатели	Значение
Ca ²⁺ , мг/кг	4,4	Водородный показатель pH	6,9
Mg ²⁺ , мг/кг	2,5	Общая жесткость, мг-экв/л	0,5
Na ²⁺ , мг/кг	63,1	Карбонатная жесткость, мг-экв/л	2,2
HCO ₃ ⁻ , мг/кг	119,0	Мутность, мг/дм ³	0,1
Cl ⁻ , мг/кг	10,8	CO ₂ свободная, мг/л	12,8
SO ₄ ²⁻ , мг/кг	39,1	Запах при 60 °С	хлорный
Общая сумма, мг/кг	238,8	Цвет	нет

2.2 Методы исследований

2.2.1. Испытание портландцемента

Испытание портландцемента проводилось в соответствии с ГОСТ 30515 – 97 «Цементы. Общие технические условия», ГОСТ 31108 – 2003 «Цементы общестроительные. Технические условия», ГОСТ 310.3 – 76* «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема», ГОСТ 30744 – 2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка», ГОСТ 6139 – 2003 «Песок для испытаний цемента», ГОСТ 23732 – 2011 «Вода для бетонов и строительных растворов».

2.2.2. Испытание песка

Испытание песка проводилось в соответствии с ГОСТ 8735-88* «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Определение водопотребности песка

Определение водопотребности песка производилось по способу, предложенному Ю.М. Баженовым и Б.Г. Скрамтаевым. Для этого предварительно устанавливают водоцементное отношение цементного теста $(B/C)_{ц}$, соответствующее его нормальной плотности. Для этого 900 граммов цемента смешивают с таким количеством воды, которое обеспечит на встряхивающем столике расплыв конуса 170 мм. Затем приготавливают раствор состава Ц:П = 1:2 на исследуемом песке и подбирают $(B/C)_{р}$, при котором раствор имеет такой же расплыв конуса. Для раствора дозируют 300 граммов цемента и 600 граммов песка, материалы в сухом виде предварительно смешивают, заливают требуемое количество воды затворения и перемешивают в течение 5 минут. Водопотребность песка $V_{п}$ (%) будет определяться по формуле:

$$V_{п} = \frac{(B/C)_{р} - (B/C)_{ц}}{2} \cdot 100 \quad (2.2.2.1)$$

2.2.3. Испытание микрокремнезема

Испытание микрокремнезема проводилось в соответствии с ТУ 5743-048-02495332-96 «Микрокремнезем конденсированный».

Определение водопотребности микрокремнезема

Водопотребность микрокремнезема по неизменности подвижности бетонной смеси определяют следующим способом: готовят контрольный состав смеси при соотношении Ц:П = 1:2 объемом 7 литров с таким количеством воды затворения B_1 , которое может обеспечить жесткость бетонной смеси 30 секунд или подвижность с осадкой конуса 1 см. Во втором составе производят замену 10 % цемента микрокремнеземом и контролируют равноподвижность смеси за счет увеличения расхода воды B_2 . В результате получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} B_1 = 0,01 \cdot П \cdot B_{П} + Ц_1 \cdot W \\ B_2 = 0,01 \cdot (П \cdot B_{П} + МК \cdot B_{МК}) + Ц_2 \cdot W \end{cases} \quad (2.2.3.1)$$

где $П$, $МК$ и $Ц$ – расходы песка, микрокремнезема и цемента соответственно, кг; W – истинное водоцементное отношение; $B_{П}$ – водопотребность песка, %; $B_{МК}$ – водопотребность микрокремнезема, %.

В результате преобразования системы уравнений водопотребность микрокремнезема ($B_{МК}$) будет определяться по следующей формуле:

$$B_{МК} = \frac{B_2 - B_1 + (Ц_1 - Ц_2) \cdot W}{МК} \cdot 100\% \quad (2.2.3.2)$$

2.2.4. Испытание добавки

Испытание добавки проводилось согласно ГОСТ 24211 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические требования» и ГОСТ 30459 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

2.2.5. Испытание бетонной и фибробетонной смеси

Исследование технологических свойств бетонных и фибробетонных смесей проводилось в соответствии с ГОСТ 10181 – 2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний»; ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия».

Определение воздухововлечения бетонных и фибробетонных смесей

Измерение объема вовлеченного воздуха в приготовленных бетонных и

фибробетонных смесях проводилось поромером Testing 1.0335 (рис. 2.2.5.1). Данный прибор соответствует нормам DIN 1048, EN 12350-7, ASTM C 231, BS 1881 и имеет габариты с тарой 400*400*800 мм. Объем емкости для образца - 8 л. Манометр имеет класс точности 1,0.



Рис. 2.2.5.1. - Общий вид поромера Testing 1.0335

Прибор представляет собой герметично закрывающийся металлический сосуд объемом 8 литров. В верхней съемной части расположен манометр, клапаны и вакуумный насос. Принцип работы основан на методе выравнивания давлений. Испытательный прибор Testing 1.0335 имеет напорную камеру, в которой создается заданное давление ручным механическим насосом. При открытии перепускного клапана происходит выравнивание давления с емкостью образца, которая заполнена бетонной смесью. Падение давления используется для определения содержания воздуха в смеси.

Порядок проведения испытания

1. Снять измерительную головку прибора (напорная камера с манометром). На емкость для бетона закрепить насадку – кольцо;
2. Заполнить емкость готовой фибробетонной (бетонной) смесью выше верхнего края и уплотнить ее (штыковкой или на вибрационном столике);
3. Снять насадку – кольцо и стальной линейкой убрать излишний бетон, выровнявая его по уровню верхнего края емкости;

4. Очистить край емкости влажной тряпкой или губкой;
5. Поставить измерительную головку прибора, соблюдая при этом совпадение красных маркировок (точек) емкости, и герметично прикрепить попарно диагонально лежащие зажимные крепления;
6. Открыть клапаны (положение наверх);
7. Через левый клапан заполнять прибор водой с помощью брызгалки до тех пор, пока весь воздух не выйдет через противоположный клапан. Для этого следует держать прибор в легко наклоненном положении налево, таким образом, чтобы правый клапан стоял вертикально. Отсутствие пузырьков воздуха в вытекаемой воде означает полное удаление воздуха из прибора;
8. Закрыть оба клапана;
9. Открыть перепускной вентиль и выровнять давление в головке и емкости и качать, пока стрелка манометра не установится в 10 мм за «красной регулировочной отметкой», затем точно установить стрелку сбрасыванием давления перепускным клапаном;
10. Ручным насосом создать требуемое давление и нажать кнопку TEST;
11. Отсчитать показания содержания воздуха фибробетонной смеси по показанию манометра в процентах;
12. После проведения испытания медленно открыть оба клапана, чтобы сбросить давление в сосуде;
13. Открыть перепускной вентиль путем нажатия кнопки TEST и сбросить остаточное давление в измерительной головке и сосуде. При этом стрелка манометра медленно возвращается в исходное положение.

2.2.6. Испытание бетонов и фибробетонов

Испытание бетонов и фибробетонов проводилось в соответствии с ГОСТ 12730.1 – 78 «Бетоны. Метод определения плотности», ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 25192 – 2011 «Бетоны. Классификация и общие технические требования», ГОСТ 26633 – 2012 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 31914 – 2012

«Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», ГОСТ 29167 – 91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», ГОСТ 12730.5 – 84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости», ГОСТ 17624-2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности», ГОСТ 10060 – 2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», ГОСТ 24544 – 81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести».

Исследование процесса структурообразования бетонов и фибробетонов

Исследование процесса структурообразования бетона и фибробетона на ранних и поздних сроках твердения проводилось импульсным ультразвуковым методом по изменению скорости прохождения ультразвука.

Сроки набора прочности и продолжительность периода формирования структуры фиксировались с помощью прибора УК-14 П в образцах с базой прозвучивания 200 мм в соответствии с ГОСТ 17624 – 2012. Датчики устанавливаются неподвижно и фиксируются с определенной силой прижатия к образцу. Образец должен быть правильной геометрической формы, а опалубка не должна проводить электрический ток и влиять на магнитное поле. Скорость прохождения ультразвука определяют по формуле:

$$V = \frac{l}{t} \cdot 1000, \quad (2.2.6.1)$$

где V - скорость прохождения ультразвука, м/с; l - база прозвучивания (расстояние между датчиками при сквозном прозвучивании), мм; t - время прохождения ультразвука, мкс.

Показания прибора снимают каждые 30 минут, вычисляют скорость прохождения ультразвука и строят график зависимости $V - t$. Точка резкого снижения скорости ультразвука соответствует началу периода формирования структуры.

Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) бетонов и фибробетонов

Трещиностойкость (вязкость разрушения) оценивалась по результатам испытаний бетонных и фибробетонных образцов с искусственным надрезом по типу 1 (рис. 2.2.6.1) в соответствии с ГОСТ 29167 – 91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». Начальные надрезы наносят при помощи режущего инструмента или при формировании образцов путем закладывания фольги либо латунной (или стальной) пластины. Ширина начального надреза не должна превышать $0,5 d_{am}$ и быть не более 2 мм.

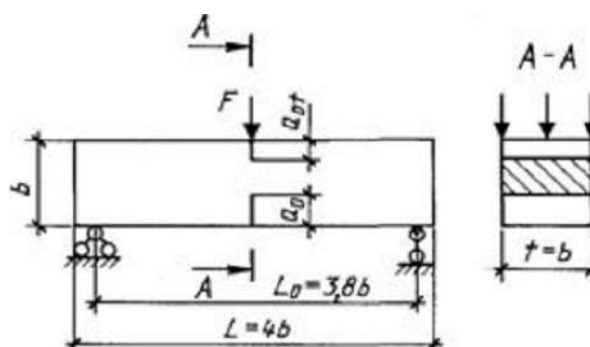


Рис. 2.2.6.1. - Расчетная схема для определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях образцов на изгиб

Истинные значения условного критического коэффициента интенсивности напряжения K_c^* определялись по формуле:

$$K_c^* = \frac{3 \cdot F_c^* \cdot L_0}{\left(\frac{2 \cdot b^{0,5} \cdot t \cdot \sqrt{a_0}}{b \cdot (1,93 - 3,07 \cdot \lambda + 14,53 \cdot \lambda^2 - 25,11 \cdot \lambda^3 + 25,8 \cdot \lambda^4)} \right)}, \quad (2.2.6.2)$$

где F_c^* - нагрузка на образец, МН; L_0 – расстояние между опорами, м; b , t – размеры образцов, м; $\lambda = (a_0 + a_{0t})/b$ – относительная длина начального надреза; a_0 , a_{0t} – длина начального надреза, м.

Определение деформаций усадки бетонов и фибробетонов

Усадка бетонных и фибробетонных образцов определялась по ГОСТ 24544-81 «Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести» и по методике Шейкина А.Е. в условиях квазистатической сушки. В качестве образцов использовались призмы размером 40*40*160 мм. Сначала на торцевые поверхности всех образцов, предназначенных для определения усадки, приклеивали реперы с диаметром основания репера не более 20 мм, а высота - не

более 15 мм. Приклеиваемую поверхность репера обезжиривали органическим растворителем. Репер нагревали до температуры 50-60 °С и прижимали к образцу в центре торцевой грани, на которую предварительно были нанесены 2-3 капли клея.

Образцы выдерживались в течение 28 суток на приборе при относительной влажности воздуха менее 60 % в условиях квазистатической сушки, при которой перепады влагосодержания внутри и на поверхности образцов остаются очень маленькими.

Измерение усадки выполнялись при помощи разработанного устройства, оснащенного индикаторами ИЧ с точностью 0,0025 мм (рис. 2.2.6.2).

Для измерения деформаций усадки подготовленные образцы устанавливали в устройство для испытания и снимали начальные отсчеты по показаниям прибора в первые 12 часов твердения, затем на протяжении 28 суток. По результатам испытаний определены средние значения абсолютных деформаций $\Delta l(t)$.



Рис. 2.2.6.2. - Устройство для измерений деформаций усадки.

Далее по средним абсолютным значениям деформаций определили относительную деформацию усадки $\varepsilon(t)$ по формуле:

$$\varepsilon_i(t) = \frac{\Delta l_i(t)}{l}, \quad (2.2.6.3)$$

где $\Delta l_i(t)$ – значение абсолютной деформации образца, мм; l – базовая длина образца, мм.

Определение водонепроницаемости бетонов и фибробетонов

Водонепроницаемость бетона определяется прибором Агама – 2Р по результатам испытаний серии из шести образцов - кубов с ребром 150 мм. Принцип работы прибора заключается в измерении времени прохождения через образец единицы объема газа (с/см³), после проведения испытания используя переводную таблицу рассчитывается класс бетона по водонепроницаемости. Конструкция прибора АГАМА-2Р представлена на рисунках 2.2.6.3 и 2.2.6.4.

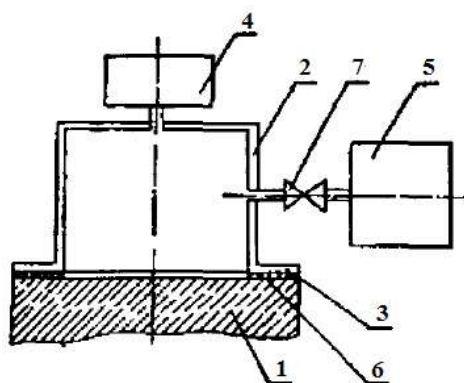


Рис. 2.2.6.3. - Конструкция прибора АГАМА-2Р

1 – бетонный образец, 2 – камера устройства, 3 – фланец камеры, 4 – вакуумметрический датчик, 5 – вакуум-насос, 6 – герметизирующая мастика, 7 – вентиль

Образцы должны твердеть в одинаковых условиях с конструкциями, имеющими бетон аналогичного состава и возраста. Испытания проводят при температуре воздуха от +1 до +40 °С. Перед проведением испытаний образцы должны быть подсушены в течение 2-х суток, а их торцевые поверхности - очищены от поверхностной пленки цементного камня.

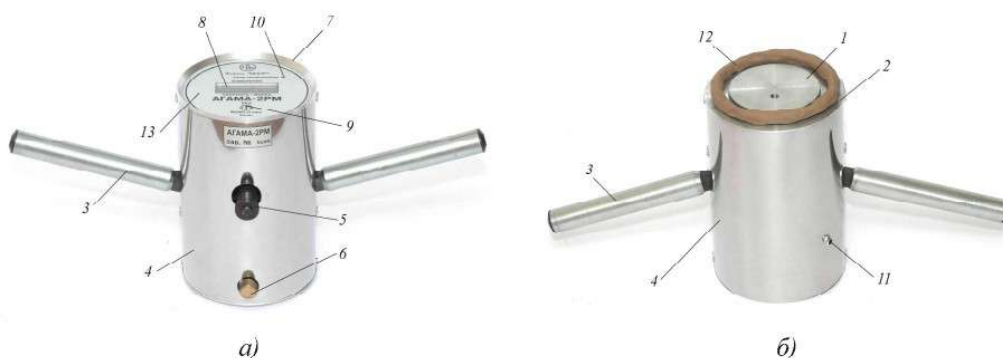


Рис. 2.2.6.4. - Прибор Агама – 2Р: а) вид сверху; б) вид снизу.

Порядок проведения испытания

1) Подключить прибор к сети 220 В и включить кнопку 9, расположенную на лицевой панели;

2) Отвернуть фиксатор против часовой стрелки на 5-6 оборотов и перевести рукоятки в верхнее положение так, чтобы торец поршня выступал над поверхностью фланца камеры на 3-5 мм;

3) Приготовить из герметизирующей мастики, входящей в комплект поставки, жгут диаметром 6-9 мм, уложить жгут по средней линии фланца камеры и соединить его концы, удалив излишки;

4) Закрывать клапан давления 6, вращая колпачок до упора и фиксатор 5, и установить прибор выступающим торцом поршня на поверхность испытываемого материала;

5) Плавно нажать на рукоятки 3, опустив их в нижнее рабочее положение. Оставить прибор на поверхности материала, отпустив ручки механизма. По мере поступления воздуха из окружающей среды через испытуемый материал в полость камеры, столбик индикации оставшегося времени измерения перемещается вправо. За 100% измерения берётся время окончания процесса измерения;

6) По окончании измерения на индикаторе устанавливается два значения. В верхней строчке выводится значение сопротивления проникновению воздуха через материал в с/см^3 , а в нижней - марка бетона по водонепроницаемости;

7) Выключить прибор нажатием и удержанием (более 3 секунд) кнопки на лицевой панели прибора;

8) Снять прибор с поверхности испытываемого материала. Для этого отвернуть колпачок клапана давления, после чего отвернуть фиксатор против часовой стрелки на 5...6 оборотов. Далее плавно переместить рукоятки в верхнее положение. Снять прибор за рукоятки, установить его блендой вниз, мастерком очистить рабочую поверхность фланца от мастики;

9) Герметизирующую мастику можно использовать многократно, предварительно удаляя из нее инородные включения;

10) По таблице 8 или по установленной градуировочной зависимости определяют марку бетона по водонепроницаемости (W), соответствующую полученному значению a_c или m_c .

Градуировочная таблица для определения водонепроницаемости бетона

Параметр воздухонепроницаемости бетона a_c , $\text{см}^3/\text{с}$	Сопротивление бетона прониканию воздуха m_c , $\text{с}/\text{см}^3$	Марка бетона по водонепроницаемости W , $\text{МПа}\cdot 10^{-1}$
0,325 – 0,224	3,1 – 4,5	2
0,223 – 0,154	4,6 – 6,5	4
0,153 – 0,106	6,6 – 9,4	6
0,0105 – 0,0728	9,5 – 13,7	8
0,0727 – 0,0510	13,8 – 19,6	10
0,0509 – 0,0345	19,7 - 29	12
0,0237 – 0,0164	42,1 – 60,9	16
0,0163 – 0,0113	61 – 88,5	18
0,0112 – 0,0077	88,6 – 130,2	20

Определение морозостойкости бетонов и фибробетонов

Морозостойкость бетона и фибробетона определяется по ГОСТ 10060 – 2012 по базовому методу с помощью дисплейной морозильной камеры Derby EK-36 X путем замораживания-оттаивания и испытания на прочность при сжатии образцов - кубов с ребром 100 мм. Характеристики морозильной камеры представлены в таблице 2.2.6.2.

Таблица 2.2.6.2

Характеристики морозильной камеры Derby EK-36 X

Температурный режим	от -22 до -11 °С
Объем	317 л
Крышка	прозрачная
Напряжение	220 В
Потребляемая мощность	0,155 кВт/ч
Ширина	1040 мм
Глубина	650 мм
Высота	895 мм
Вес (без упаковки)	52,5 кг

Образцы для определения морозостойкости бетона не должны иметь внешних дефектов. Разброс значений плотности отдельных образцов в серии до их насыщения не должен превышать $30 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Массу образцов определяют с погрешностью не более 0,1%. Контрольные образцы бетона перед испытанием на прочность, а основные образцы перед замораживанием насыщают водой или 5 %-ным водным раствором хлорида натрия температурой (20 ± 2) °С с погружением на 1/3 их высоты на 24 ч, затем уровень повышают до 2/3 высоты образцов и выдерживают в таком состоянии еще 24 ч, после чего образцы полностью погружают в воду или раствор на 48 ч так, чтобы уровень жидкости был выше образцов не менее чем на 20 мм.

Число циклов испытания основных образцов бетона в течение одних суток должно быть не менее 1. Испытания следует вести непрерывно и в следующем порядке: образцы помещаются в морозильную камеру и замораживаются до -18°C , затем оттаиваются. Воду в ванне для оттаивания образцов меняют через каждые 100 циклов. При вынужденных перерывах в испытании образцы должны храниться в замороженном состоянии в морозильной камере. Режимы замораживания - оттаивания следует проводить в соответствии с таблицей 2.2.6.3. После определенного количества циклов производятся промежуточные испытания кубиков на прочность, и затем испытания продолжают до того момента, пока не произойдет потеря прочности ниже расчетной.

Таблица 2.2.6.3

Режимы испытаний образцов

Размер образца, мм	Режим испытаний			
	замораживание		оттаивание	
	время, ч не менее	температура, °С	время, ч не менее	температура, °С
100*100*100	2,5	-18 ± 2	$2 \pm 0,5$	$+20 \pm 2$

Марку бетона по морозостойкости принимают по таблице 4 ГОСТ 10060-2012 с учетом числа циклов, при котором уменьшение массы образцов не превышает 2 % и на них отсутствуют трещины, сколы, шелушение ребер. Для бетона, к поверхности которого предъявляют требования по декоративности, и для бетона покрытий автомобильных дорог и аэродромов шелушение поверхности образцов не допускается.

2.2.7. Исследование цементного камня

РФА цементного камня из обычного и модифицированного вяжущего проводился на рентгеновском стационарном дифрактометре Дрон-3 (рис. 2.2.7.1).



Рис. 2.2.7.1. - Дифрактометр рентгеновский ДРОН-3

Аппарат имеет возможность управления от электронно-вычислительных машин с сопряжением 2К или других ЭВМ через дополнительный интерфейс.

Приставки, входящие в комплект аппарата, позволяют проводить следующие исследования структуры кристаллических и аморфных материалов:

- прецизионное определение параметров решетки кристаллических веществ;
- определение размеров кристаллитов;
- изучение напряженного состояния вещества (напряжения I и II рода);
- исследование текстур;
- качественный и количественный фазовый анализ;
- изучение структурных изменений, происходящих в деформированных металлах при нагреве;
- определение аморфности вещества.

Расшифровка рентгенограмм проводилась при использовании кристаллографической базы МИНКРИСТ.

Выводы по 2-й главе:

1. Исследования свойств сырьевых компонентов проводились на современном поверенном и сертифицированном оборудовании в соответствии с общепринятыми стандартами РФ в Областной строительной лаборатории по испытанию и сертификации строительных и дорожных материалов, изделий и конструкций ФГБОУ ВО Костромская ГСХА и в Строительной лаборатории ОАО «Мостостроительный отряд № 19» г. Санкт-Петербург.

2. Для оценки фазового состава модифицированного вяжущего, а также идентификации веществ и новообразований, использовался рентгенофазовый анализ. Обработка полученных данных проводилась с использованием программ PANalytical X'Pert HighScore и Origin 7 (v.7.0220).

3. Радиологические исследования модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй проводились на универсальном спектрометрическом комплексе УСК "Гамма Плюс" в Испытательном лабораторном центре ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Костромской области» г. Кострома. Прибор УСК "Гамма Плюс" применяется в лабораторных условиях как установка специального назначения и является средством для измерения активности радионуклидов в строительных материалах и других объектах окружающей среды.

4. Детальное изучение применяемых материалов и комплексный подход к определению химических, физико-механических и радиологических свойств и показателей модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй, а также использование современного испытательного оборудования позволяет говорить о достоверности и обоснованности полученных результатов.

Глава 3. Особенности разработки составов и исследование структуры модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Получение долговечных бетонных и фибробетонных конструкций и изделий возможно благодаря тщательному исследованию физико – химических и механических свойств компонентов, отработки технологии приготовления смеси, совершенствование способов ее формования и укладки и соответствующего ухода за композитом в период набора прочности.

В настоящее время разработаны многочисленные способы управления формированием структуры бетонов и фибробетонов и выявлены особенности изменения их свойств в зависимости от применения различных видов добавок, микронаполнителей и дисперсного армирования.

Существенное повышение эффективности фибробетонов может быть достигнуто благодаря полному использованию возможностей композиционных и многокомпонентных вяжущих веществ, созданию оптимальной структуры цементного камня в бетоне. Модифицирование вяжущего может быть обеспечено за счет введения полифункциональной химической добавки, эффект водоредуцирующего и воздухововлекающего действия которой положительно отражается на свойствах бетонов и фибробетонов. Особый интерес представляет микроармирование матрицы волокнами, однако, как уже отмечалось ранее, недостаточно изучены свойства полипропиленовой фибры и ее влияние на формирование свойств модифицированных мелкозернистых бетонов.

Данные исследования в комплексе затрагивают актуальные проблемы ресурсосбережения, утилизации отходов промышленности, снижения энергозатрат, увеличения межремонтного ресурса конструкций, а также применения высокотехнологичных и инновационных материалов в строительстве. Таким образом, теоретические предпосылки получения фибробетонов с высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками основываются на применении многокомпонентного вяжущего, эффективного модификатора – гиперпластификатора и микроармирования бетона

полипропиленовой фиброй. Именно их общее взаимодействие друг с другом позволяет регулировать процессы структурообразования, стабилизировать реологические и технологические свойства смесей и совершенствовать прочностные и эксплуатационные показатели бетонов и фибробетонов.

С этой целью были проведены изучение свойств и разработка модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй на основе многокомпонентного вяжущего в следующем порядке:

- оптимизация состава многокомпонентного вяжущего, состоящего из цемента и микрокремнезема, не подверженного предварительной активации;
- исследование мелкозернистых бетонов на основе многокомпонентного вяжущего с разным соотношением между песком и цементом;
- исследование мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй, модифицированных поликарбоксилатной химической добавкой;
- исследование взаимодействия модифицирующих компонентов и их влияния на технологические, прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства мелкозернистого бетона;
- разработка рекомендаций для подбора составов модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй и апробация составов.

Проведенные опыты раскрывают особенности работы полипропиленовой фибры в конструкциях и ее влияния на показатели качества фибробетонов. Результаты экспериментов позволяют расширить область применения модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй, в том числе и в ответственных конструкциях.

3.1. Способы производства и применения вяжущего с микрокремнеземом

Свойства и активность МК зависят от его удельной поверхности, доли диоксида кремния и т.д. Немаловажным критерием применения являются способы производства и формы микрокремнезема:

- неуплотненный микрокремнезем (МК-85, МК-65): собран из фильтров, представляет собой ультрадисперсный порошок серого цвета, используется без

специальной обработки в производстве составов - фасованных материалов, строительных и цементных растворов, плотность составляет 200-350 кг/м³;

- уплотненный микрокремнезем (МКУ-85, МКУ-65): получен путем уплотнения МК до 500-600 кг/м³ с помощью специального оборудования; имеет вид мелких гранул с размером до 0,5 мм, удобен в транспортировке в сухом виде и дозировке при изготовлении готовой бетонной смеси;

- гранулированный микрокремнезем: обработан с добавлением небольшого количества воды, конечный продукт - твердый агломерат с плотностью около 1000 кг/м³; используется для совместного измельчения с цементом.

- суспензия (паста) (МКС-85): текучая жидкость темно-серого цвета с массовой долей уплотненного микрокремнезема не менее 40 % и плотностью 1280 кг/м³.

Суспензия производится путем смешивания сухого микрокремнезема, воды, пластификатора и стабилизатора. Компоненты при приготовлении суспензии (пасты) принимаются в следующем соотношении (% от общей массы):

- микрокремнезем конденсированный сухой формы 40–70 %;
- пластификатор (суперпластификатор С-3)- 0,02 – 0,14 %;
- стабилизатор (нитрилотриметиленфосфоновая кислота) 0,02 – 0,14 %;
- вода – остальное.

Все материалы интенсивно перемешиваются до образования однородной суспензии 40-70%-ной концентрации. Смесь нитрилотриметиленфосфоновой кислоты и продукта конденсации нафталинсульфо кислоты с формальдегидом, приводит к диспергации микрочастиц МК, образованию малопроницаемых адсорбционных слоев и модифицированию электрического слоя на поверхности частиц микрокремнезема. Это приводит к совокупному стерическому и электростатическому эффекту стабилизации суспензии, благодаря чему увеличивается агрегативная устойчивость и текучесть во времени и повышается ее активность как минеральной добавки для бетона.

Приготовление концентрированной суспензии производят путем смешивания микрокремнезема в количестве 70-75% от общей массы со

стабилизирующим компонентом соляной, серной или уксусной кислоты (0,35%; 0,74%; 0,37% от массы МК соответственно). В данном способе, стабилизатор из кислоты вызывает относительно кратковременный эффект агрегативной устойчивости суспензии (до 15 суток), так как кислота постоянно нейтрализуется щелочными компонентами микрокремнезема. При более длительном хранении или транспортировке пасты происходит уплотнение частиц микрокремнезема и возникает необходимость дополнительного перемешивания и периодического добавления нового количества кислоты, что приводит к снижению качества суспензии и активности микрокремнезема. Недостатком такой суспензии также является подверженность замерзанию.

Микрокремнезем конденсированный обладает высокой водопотребностью, поэтому его рекомендуется применять совместно с пластификаторами и другими эффективными полифункциональными добавками.

Процедуры смешивания могут отличаться в зависимости от производственного оборудования. Общее правило заключается в тщательном перемешивании для обеспечения максимальной дисперсии микрокремнезема или суспензии в бетоне. Различают два типа вяжущих, полученных с помощью минеральной добавки МК:

- многокомпонентные – с заменой части цемента активной минеральной добавкой и применением традиционных методов перемешивания;
- смешанные (композиционные) - с заменой части цемента активной минеральной добавкой и последующей механохимической активацией (совместным помолом).

Для смешанных вяжущих характерны более высокие показатели активности и прочности, но для их получения необходимо специальное оборудование, которое могло бы обеспечивать качество смеси, фиксировать время помола и контролировать удельную поверхность вяжущего.

Многокомпонентные вяжущие (МКВ) более просты в приготовлении, отчего совершенствование и оптимизация их свойств имеют особое значение для технологии строительства. Ключевым вопросом в получении бетонов высокого

качества на основе МКВ является эффективность диспергирования микрокремнезема в смеси. Загрузка компонентов в смесители осуществляется в следующем порядке: совместно цемент, микрокремнезем и песок, затем добавляется вода с химической добавкой и фибра (для фибробетона). Равномерность распределения микрочастиц МК в сухой или влажной смеси достигается тщательным перемешиванием с цементом и песком. При этом частицы микрокремнезема и песка обладают более высокой твердостью и прочностью по сравнению с частицами цемента (твердость 7 и 5-6 баллов соответственно по шкале Мооса [67]) и поэтому при скоростном смешении выполняют роль абразивных мелющих тел.

При контакте влажного песка, цемента и микрокремнезема вода начинает интенсивно взаимодействовать с частицами вяжущего с образованием в поверхностном слое цементных частиц первичных продуктов гидратации - гидроксида кальция, гидросиликатов и гидроалюминатов кальция. За счет этого взаимодействия происходит аморфизация и дополнительное диспергирование поверхностного слоя частиц цемента, который легко сдвигается частицами песка и МК и образует в цементно-песчаной смеси фракцию высокоактивных частиц нанодисперсного размера.

При интенсивном механическом воздействии на цементно-песчаную смесь происходит также удаление адсорбированного воздуха с поверхности частиц и замещение его пленкой воды толщиной в несколько молекул воды, особенно на свежесформированных плоскостях разрушения частиц. На этих пленках происходит конденсация преимущественно нанодисперсных частиц продуктов гидратации цемента за счет адгезионного взаимодействия и достигается равномерное распределение цемента, микрокремнезема и воды на поверхности частиц песка во всех микрообъемах цементно-песчаной смеси.

3.2. Влияние мелкого заполнителя на свойства мелкозернистых бетонов

Макроструктура мелкозернистого бетона на основе многокомпонентного вяжущего представляет собой однородную среду, образованную плотно

упакованными зернами цемента, микрокремнезема и песка. Максимальная прочность и плотность бетонов обеспечивается только при правильном фракционном составе всей бетонной смеси [3; 68, с. 17].

Поскольку основным компонентом мелкозернистого бетона является песок, то контроль его качества и регулирование гранулометрического и химического составов являются одним из важнейших способов улучшения реологических, технологических и прочностных свойств композитов. Кроме того, модуль крупности, прочность зерен и состав песка влияют на плотность, водопотребность и воздухововлечение бетонной смеси, прочность цементного камня и, следовательно, на свойства мелкозернистого бетона [69; 70].

В качестве мелкого заполнителя для бетонов и фибробетонов рекомендуется применять природные кварцевые или кварцево-полевошпатовые пески с модулем крупности не менее 2,5 и полным остатком на сите с отверстиями 0,63 мм не менее 50 %, а также пески из отсевов дробления и их смеси, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8736-93* и ГОСТ 8735-88*.

В мелкозернистых бетонах, предназначенных для устройства нижних слоев двухслойных покрытий дорог и для оснований, можно использовать крупные и средние пески с модулем крупности не менее 2,0 и полным остатком на сите 0,63 мм не менее 30 %. Применение мелких природных песков с $M_k = 1,5-2,0$ и полным остатком на сите с 0,63 мм 10-30 % допускается при соответствующем технико-экономическом обосновании.

Целесообразно также применять фракционированные пески и производить опытные подборы сочетаний фракций для получения минимальных значений пустотности и удельной поверхности заполнителей.

Использование мелких рядовых песков приводит к значительному повышению водопотребности бетонных смесей и еще большему расходу вяжущего. Особенно ухудшают технологические свойства мелкозернистых бетонов пески с большим содержанием частиц мельче 0,3—0,6 мм и наличием пылеватых и глинистых включений.

В процессе приготовления, транспортировки и укладки в мелкозернистой бетонной смеси изменяется количество вовлеченного воздуха, зависящее в основном от модуля крупности песка. В ориентировочных расчетах составов на 1 м³ бетонной смеси рекомендуется принимать поправки на воздухововлечение в зависимости от технических свойств песка по таблице 3.2.1.

Таблица 3.2.1

Технические свойства кварцевого песка и воздухововлечение смеси

Крупность песка	Модуль крупности M_k	Водопотребность песка, %	Воздухововлечение смеси, %	
			Подвижной	Жесткой
Мелкий	1,5...2,0	8...10	4	8
Средний	2,0...2,5	6...8	3	6
Крупный	2,5...3,0	5...6	2	5

Состав мелкозернистого бетона и качество песка определяют особенности формирования структуры и эффективность использования вяжущего в бетоне. Отсутствие скелета из крупного заполнителя и повышенное количество цементного камня у мелкозернистых бетонов повышает их деформационные свойства. Так модуль упругости мелкозернистых бетонов на 25—35% ниже модуля упругости тяжелых бетонов.

На технологические свойства мелкозернистой бетонной смеси влияют наличие примесей, гранулометрический состав, водопотребность и качество поверхности зерен песка. Эти воздействия весьма заметны при переходе от жирных смесей с большим содержанием цемента к более тощим.

В структуре мелкозернистой бетонной смеси рассматриваются четыре характерные реологические зоны, зависящие от соотношений цемента, песка и воды, обеспечивающих требуемую удобоукладываемость смеси [15, с. 188].

- Первая зона — это «жирные» смеси при соотношении цемента и песка выше 2,3. В таких смесях зерна песка находятся на значительных расстояниях друг от друга и вязкость смеси определяется ее Ц/В-отношением. Снижение расхода цемента снижает водопотребность смеси, а увеличение доли песка в смеси будет незначительно влиять на ее вязкость. При вибрировании такие смеси склонны к расслоению из-за оседания зерен песка.

- Вторая зона характеризуется соотношениями между цементом и песком от 1/4 до 2,3, т.е. включает наиболее распространенные составы мелкозернистых бетонов. В бетонных смесях второй зоны увеличение содержания песка в значительной степени сказывается на вязкости, особенно при использовании мелких песков или при замене кварцевых песков известковыми и шлаковыми.

- Третья зона характеризует область строительных растворов и охватывает область соотношений между цементом и песком примерно от 1/4 до 1/10. В данном случае зерна песка покрыты тонкими слоями цементного теста и его уже не хватает для заполнения пустот между зернами песка. Увеличение доли песка значительно повышает вязкость и водопотребность смеси.

- Четвертая зона – это «тощие» смеси с низким расходом цемента. При высоком содержании песка цементного теста уже не хватает для смазки зерен наполнителя. Для сохранения удобоукладываемости приходится увеличивать дозировки воды, однако без применения водоредуцирующих добавок это может привести к расслоению смеси.

Таким образом, выбор модуля крупности песка будет зависеть от назначения и условий эксплуатации конструкции. Наиболее экономичными являются мелкозернистые бетоны на крупных песках с П/Ц = 2÷4, при использовании же мелких песков оптимальными будут составы с П/Ц = 1÷1,5.

3.3. Особенности влияния полипропиленовой фибры на технологические и прочностные свойства мелкозернистого бетона

Для получения мелкозернистого фибробетона с наилучшими прочностными характеристиками необходимо определить оптимальный коэффициент армирования волокнами, добиться технологической совместимости матрицы бетона и равномерного распределения фибры по всему объему, не допуская образования комков.

Широкий ассортимент мультифиламентной полипропиленовой фибры позволяет применять ее как в толстостенных конструкциях, так и ремонтных составах для заделки мелких трещин.

По мнению Пухаренко Ю.В. [71], вид волокон, их относительная длина (l/d) и процентное содержание в смеси (μ) должны назначаться, исходя из требований к изделиям и конструкциям с учетом принятой технологии их изготовления. Отступление от оптимальных значений указанных параметров в большую или меньшую сторону снижает эффективность дисперсного армирования, то есть сказывается на технологических, прочностных и эксплуатационных свойствах композита.

В работе [72; 73] отмечено, что высокая удельная поверхность полипропиленовой фибры может положительно влиять на формирование структуры бетонной матрицы в области ее контакта с волокнами; при уменьшении же длины фибр обеспечение равноценного прочностного эффекта может быть достигнуто увеличением расхода волокон. Данное суждение подтверждается результатами математических расчетов и измерений полипропиленовой фибры длиной 1,5 - 45 мм и диаметром 20 и 30 мкм.

На рисунках 3.3.1 и 3.3.2 представлены графики изменений площади поверхности $S_{уд}$ и модуля поверхности M_s полипропиленовой фибры в зависимости от ее геометрических размеров.

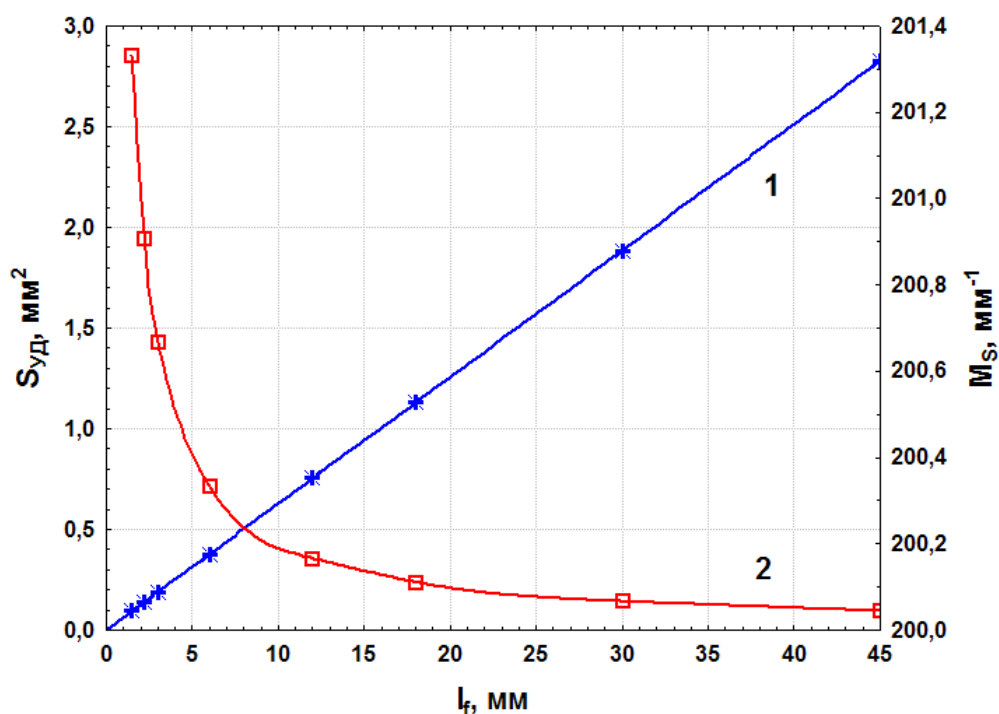


Рис. 3.3.1. – Графики изменения площади поверхности $S_{уд}$ (1) и модуля поверхности M_s (2) полипропиленовой фибры диаметром $d = 20$ мкм.

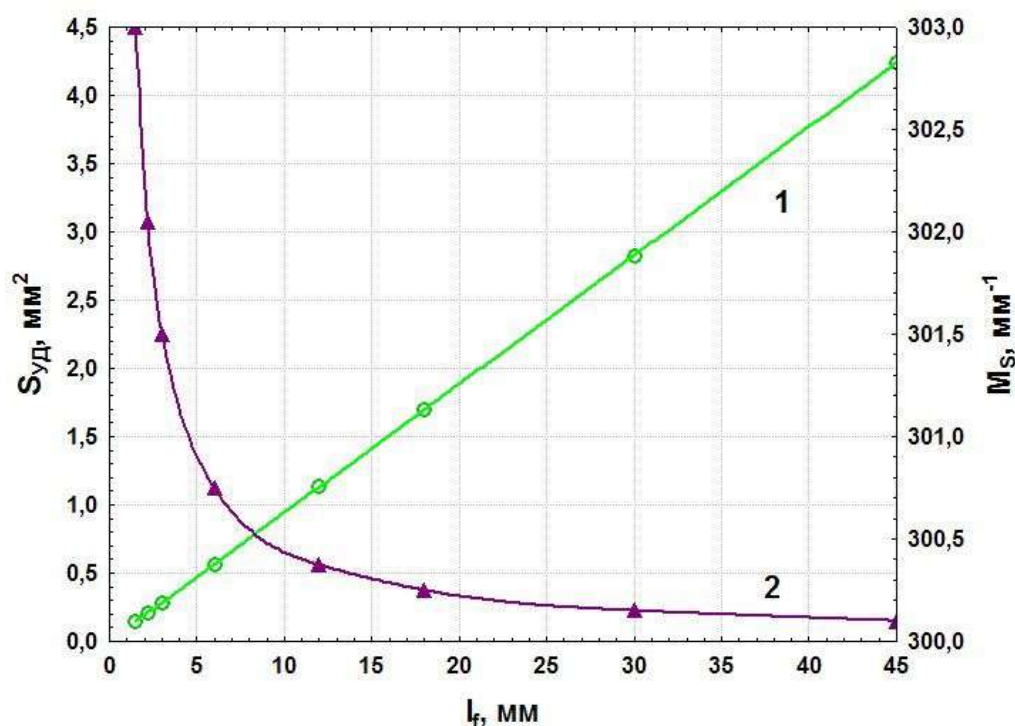


Рис. 3.3.2. – Графики изменения площади поверхности $S_{уд}$ (1) и модуля поверхности M_s (2) полипропиленовой фибры диаметром $d = 30$ мкм.

Площадь поверхности $S_{уд}$ определялась как площадь боковой поверхности одного элементарного волокна, а модуль поверхности M_s - как отношение площади поверхности к объему волокна. Значения данных параметров определяются системами уравнений:

$$\text{- для фибры } d = 20 \text{ мкм - } \begin{cases} S_{уд} = 0,0006 + 0,0628 \cdot l_f \\ M_s = 201,0485 - 0,0775 \cdot l_f + 0,0013 \cdot l_f^2 \end{cases} \quad (3.3.1)$$

$$\text{- для фибры } d = 30 \text{ мкм - } \begin{cases} S_{уд} = 0,0014 + 0,0942 \cdot l_f \\ M_s = 302,3592 - 0,1744 \cdot l_f + 0,0029 \cdot l_f^2 \end{cases} \quad (3.3.2)$$

Результаты исследований показывают, что 1 кг фибры длиной 18 мм может быть заменен аналогичной массой фибры длиной 6 мм (в этом случае волокон будет в 3 раза больше), что объясняется линейной зависимостью изменения площади поверхности волокна. Однако, модуль поверхности таких волокон будет незначительно изменяться. При рассмотрении полипропиленовой фибры диаметром 30 мкм и длиной 45 мм установлено, что площадь поверхности и модуль поверхности волокон на 33,5 % выше, чем у волокон диаметром 20 мкм такой же длины. Таким образом, применение мультифиламентной фибры при

равных расходах, но с разной площадью поверхности и диаметром, будет влиять на объемное содержание полипропилена в образце и, следовательно, будет незначительно изменяться прочность композита.

Для качественной оценки влияния полипропиленовой фибры на свойства бетона сопоставлены значения геометрических размеров, проценты армирования по объему μ_v (%), поверхности контакта и количество волокон, приходящихся на 1 м^3 бетона. Площадь торцевых поверхностей каждого элементарного волокна в данном случае не учитывалась. Технические характеристики исследуемых волокон представлены в таблице 3.3.1.

Таблица 3.3.1

Технические характеристики исследуемых волокон

Длина l_f , мм	Диаметр d_f , мм	l_f d_f	Содержание волокон		Поверхность контакта, $\text{м}^2/\text{м}^3$	Количество волокон, млн. шт/ м^3
			по объему μ_v , %	по массе, $\text{кг}/\text{м}^3$		
6	0,02	30	0,11	1	254,5	675
			0,22	2	508,9	1350
			0,33	3	763,4	2025
12	0,02	60	0,11	1	254,5	337
			0,22	2	508,9	675
			0,33	3	763,4	1011
18	0,02	90	0,11	1	254,5	225
			0,22	2	508,9	450
			0,33	3	763,4	675

Судя по аналитическим данным, значение параметра l_f / d_f в 3 раза у полипропиленовой фибры длиной 18 мм, чем у фибры длиной 12 мм. Однако количество элементарных волокон длиной 6 мм на 1 м^3 бетона больше в 3 раза, чем волокон длиной 18 мм. В исследовании [73] показано, что наиболее высокие показатели прочности при раскалывании получены на образцах с длиной фибры 6 мм, прочности на растяжение при изгибе - с длиной фибры 12 мм.

Для анализа изменений прочности при сжатии и на растяжении при изгибе проведены испытания образцов мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй длиной 6, 12 и 18 мм с П/Ц=3 и В/Ц=0,45, результаты которых отражены на рисунках 3.3.3 и 3.3.4 соответственно.

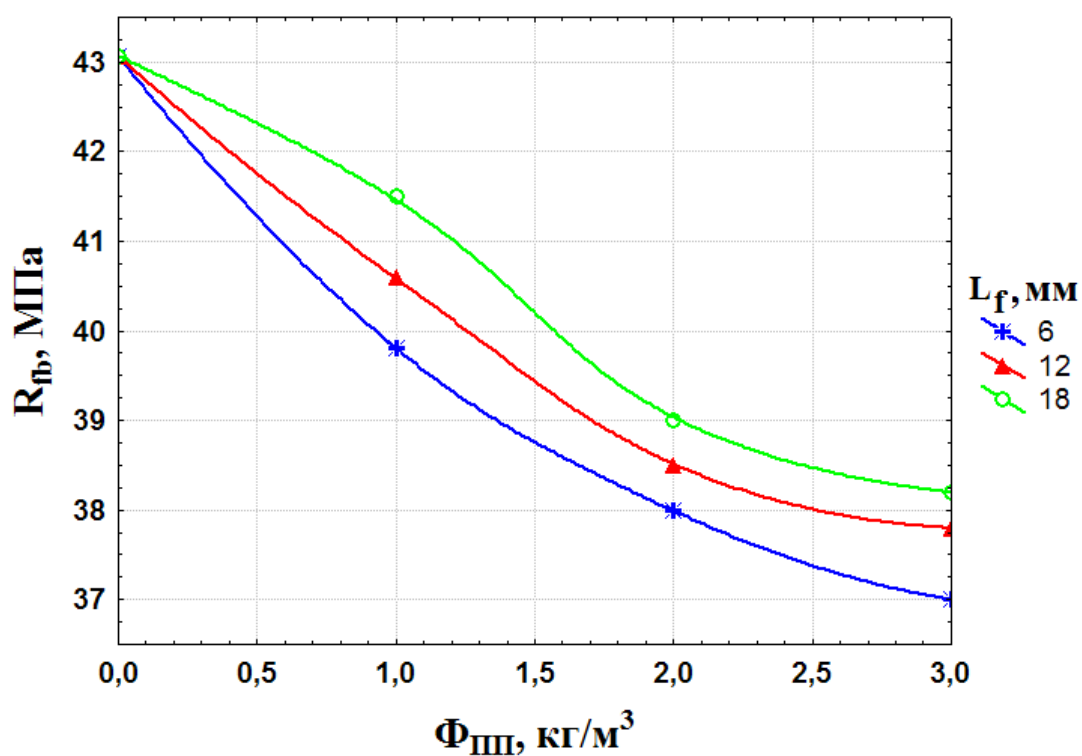


Рис. 3.3.3 - Изменение прочности при сжатии мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй длиной 6, 12 и 18 мм в зависимости от расхода.

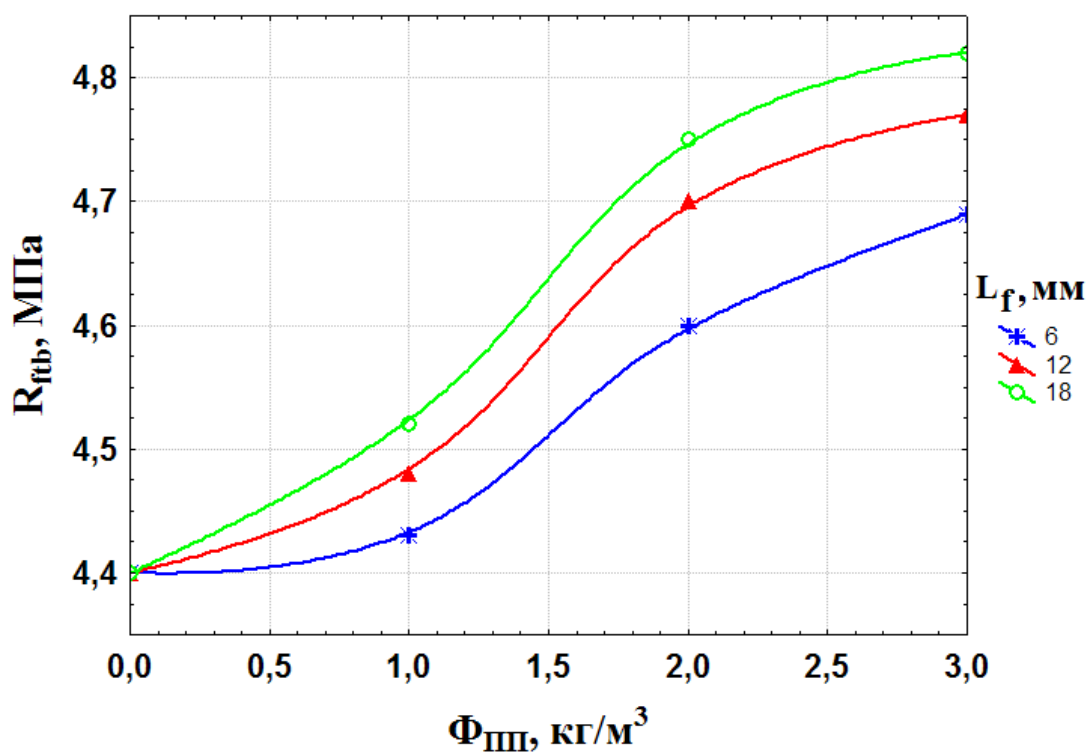


Рис. 3.3.4 - Изменение прочности на растяжение при изгибе мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй длиной 6, 12 и 18 мм в зависимости от расхода.

По результатам анализа графиков (рис. 3.3.3 и 3.3.4) получены зависимости для прогнозирования прочности при сжатии и на растяжении при изгибе мелкозернистого бетона в зависимости от расхода полипропиленовой фибры:

$$R_{fb}^6 = R_b + 0,09 \cdot \Phi_{III}^3 + 0,22 \cdot \Phi_{III}^2 - 3,58 \cdot \Phi_{III}, \quad (3.3.3)$$

$$R_{fb}^{12} = R_b + 0,17 \cdot \Phi_{III}^3 - 0,33 \cdot \Phi_{III}^2 - 2,31 \cdot \Phi_{III}, \quad (3.3.4)$$

$$R_{fb}^{18} = R_b + 0,44 \cdot \Phi_{III}^3 - 1,78 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,23 \cdot \Phi_{III}, \quad (3.3.5)$$

$$R_{fb}^6 = R_{tb} - 0,04 \cdot \Phi_{III}^3 + 0,18 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,11 \cdot \Phi_{III}, \quad (3.3.6)$$

$$R_{fb}^{12} = R_{tb} - 0,05 \cdot \Phi_{III}^3 + 0,22 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,09 \cdot \Phi_{III}, \quad (3.3.7)$$

$$R_{fb}^{18} = R_{tb} - 0,05 \cdot \Phi_{III}^3 + 0,19 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,03 \cdot \Phi_{III}, \quad (3.3.8)$$

где R_b , R_{tb} – прочности мелкозернистого бетона при сжатии и на растяжение при изгибе без фибры, МПа; Φ_{III} – расход полипропиленовой фибры, кг/м³.

Как видно из графиков, с увеличением длины фибры прочностные характеристики бетона возрастают на 3-4 %, что может объясняться следующим:

- длинные волокна позволяют хаотично пронизывать весь объем бетона, накладываться и пересекать друг друга, работать совместно и противостоять растягивающим деформациям в любой точке разрушения;

- длинные волокна ввиду большей площади поверхности имеют более сильную анкеровку и защемление, что позволяет им противостоять выдергиванию из матрицы и максимально реализовывать свои прочностные свойства;

- короткие волокна могут комковаться и распределяться неравномерно в объеме, отчего в матрице возникают слабые переармированные зоны и неармированные участки, где возможно развитие трещины;

- короткие волокна имеют слабую анкеровку и более подвержены выдергиванию.

Несмотря на то, что длинные волокна более предпочтительны, их геометрические размеры не являются главным фактором, обуславливающим прочностные характеристики фибробетона. Наиболее важными критериями эффективности полипропиленовой фибры являются расход и дисперсность в бетоне. Величины $S_{уд}$ и M_s следует учитывать при назначении толщины

конструкции, поскольку значения длины фибры взаимосвязаны условием с минимальным объемом пробы, отбираемой для исследования однородности и расслаиваемости фибробетонной смеси.

Главный показатель качества фибробетонной смеси – отсутствие комков из волокон, что положительно сказывается на формовке и уплотнении смеси.

Введение волокон независимо от их длины снижает подвижность бетонной смеси, что вызывает определенные трудности с приготовлением, перекачкой, формованием и уплотнением смеси. Прогнозирование и достижение требуемой подвижности смеси очень важно, особенно при укладке бетона с помощью бетононасосов. Практически установлено, что минимальная осадка конуса смеси для оптимальной удобоперекачиваемости по бетоноводам составляет 8 см.

Исследования фибробетонной смеси с подвижностью П1 – П5 подтверждают, что при увеличении дозировок фибры повышается связность смеси. Изменение подвижности смеси разных марок по осадке конуса в зависимости от расхода полипропиленовой фибры показано на рисунке 3.3.5.

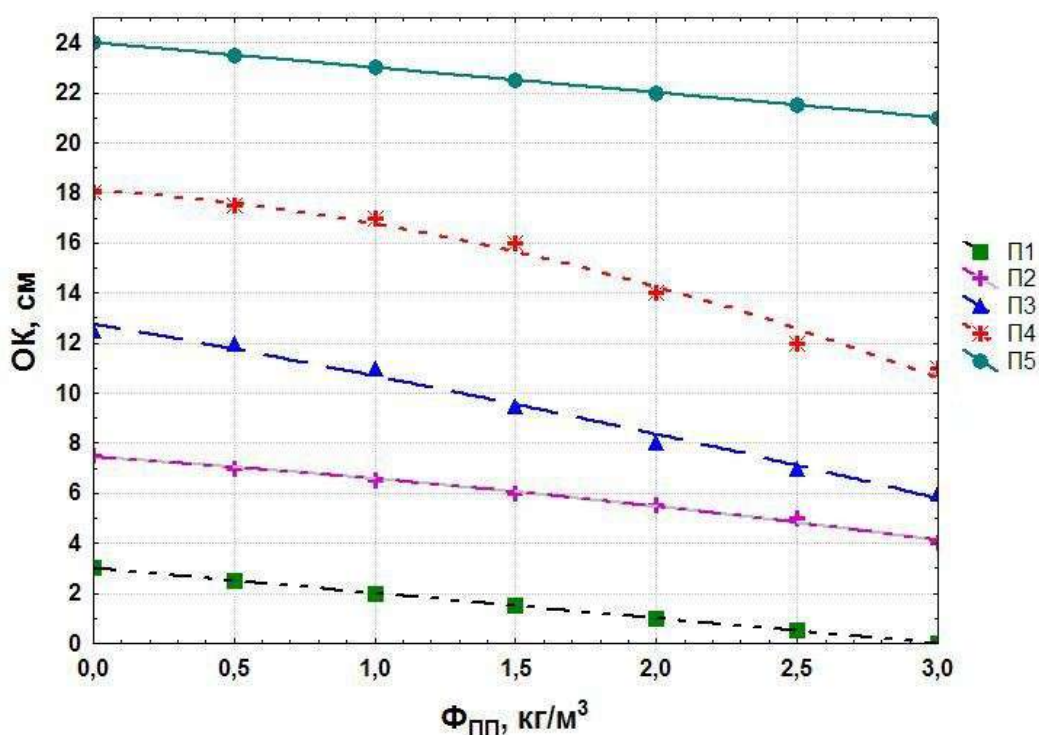


Рис. 3.3.5. – Изменение подвижности фибробетонной смеси

Полученные зависимости для марок по осадке конуса от П1 до П5 (рис. 4.4.1) означают, что подвижность смеси снижается на 3-7 см (на 30 - 60 %) при

расходе волокон от 0,5 до 3 кг/м³. Незначительное влияние на подвижность выявлено на смесях с осадкой конуса ОК=21-25 см (П5), которое объясняется избытком воды в смеси, достаточной для текучести смеси с волокнами. На примере работы автобетононасоса марки SCHWING KVM 24-4H (P 1620) установлено практически, что при расходе полипропиленовой фибры более 1,8 кг/м³ перекачка смеси с маркой по подвижности П3 уже технически сложна. В таком случае возникает необходимость проектирования составов мелкозернистых фибробетонов с учетом и технических возможностей автобетононасосов. Существенным же преимуществом полипропиленовой фибры в сравнении с металлической является «безвредность» для бетоноводов и механизмов подачи бетонной смеси автобетононасосов, а равномерное ее распределение по всему объему способствует повышению однородности и снижению расслаиваемости смеси .

Для исследования влияния расхода полипропиленовой фибры на пористость смеси применялись мелкозернистые смеси с П/Ц=3 подвижностью П1 (В/Ц=0,44) и П4 (В/Ц=0,63). Результаты представлены на рисунке 3.3.5.

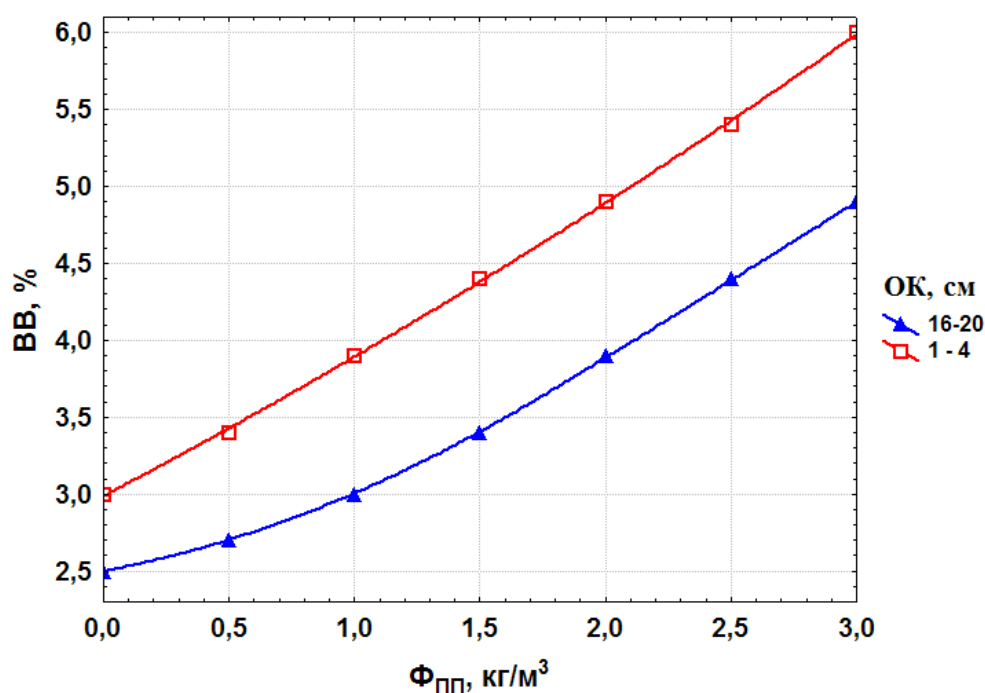


Рис. 3.3.5 - Графики изменения объема вовлеченного воздуха в мелкозернистых фибробетонных смесях подвижности П1 и П4.

При анализе графиков получены следующие зависимости изменения объемов вовлеченного воздуха в смесь от расхода полипропиленовой фибры:

$$BB_{П4} = 2,51 - 0,044 \cdot \Phi_{ПП}^3 + 0,329 \cdot \Phi_{ПП}^2 + 0,214 \cdot \Phi_{ПП}, \quad (3.3.9)$$

$$BB_{П1} = 2,99 - 0,025 \cdot \Phi_{ПП}^3 + 0,048 \cdot \Phi_{ПП}^2 + 0,857 \cdot \Phi_{ПП}, \quad (3.3.10)$$

где $BB_{П4}$ – объем вовлеченного воздуха в подвижной смеси с ОК=16-20 см; $BB_{П1}$ – объем вовлеченного воздуха в малоподвижной смеси с ОК=1-4 см.

Согласно данным исследованиям, с увеличением расхода полипропиленовой фибры количество вовлеченного воздуха возрастает в малоподвижных смесях с 3 до 6 %, в подвижных - с 2,5 до 4,9 %. Такие изменения могут объясняться множеством факторов и предположений, поскольку подобные исследования с волокнами не проводились. В исследованиях [134; 135, п. 2.4.2.19] имеются лишь упоминания о повышении воздухововлечения смеси и его допустимых нормах в фибробетонах.

Мнение производителей ультратонких волокон [74-76] сводится к тому, что с поверхности полипропиленовой фибры в бетон вносится незначительное количество воздуха, что позволяет свободной воде расширяться и сжиматься в цикле заморозания и оттаивания. Кроме того, фибра уменьшает количество водных микроканалов, что положительно сказывается на проницаемости бетона. Однако при тщательном изучении волокон (рис. 3.3.6) определено, что полипропиленовая фибра имеет гладкую поверхность и полученные при резке ровинга сплюснутые концы, улучшающие механическую анкеруемость волокон в матрице [77, с. 2].

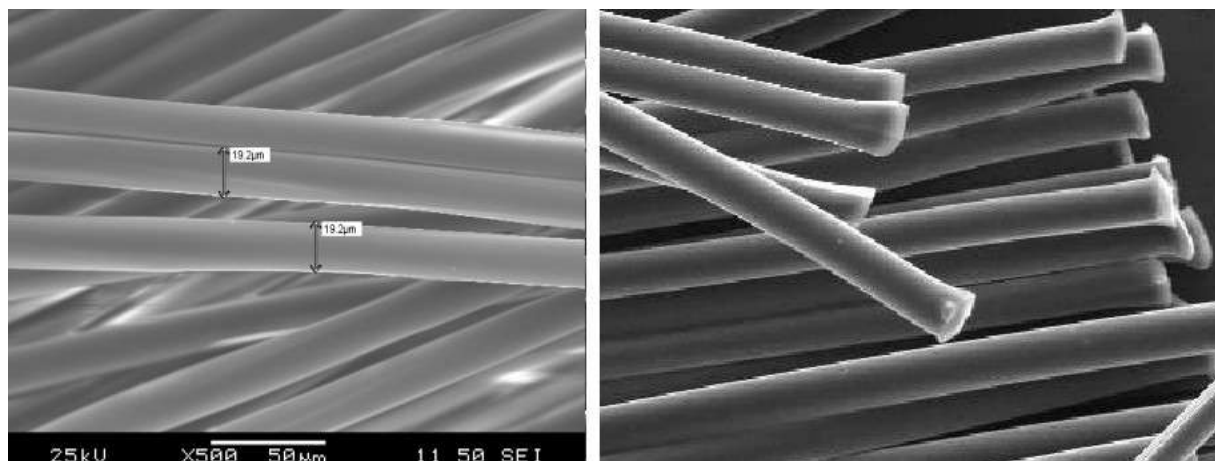


Рис. 3.3.6. – Микрофотографии полипропиленовой фибры (x500)

Микрофотографии полипропиленовой фибры (рис. 3.3.6) наглядно показывают отсутствие пузырьков воздуха на поверхности и микротрещин, что исключает возможность переноса воздуха в смесь.

Увеличение доли вовлеченного воздуха в смеси может быть объяснено результатом химических реакций, происходящих в смеси и на границе контакта волокна с водой. Известно, что при производстве непрерывных нитей полипропилена на их поверхность наносят замасливающие препараты, снимающие электростатические заряды и обеспечивающие компактность и гладкость нити при дальнейших производственных операциях [78, с. 202].

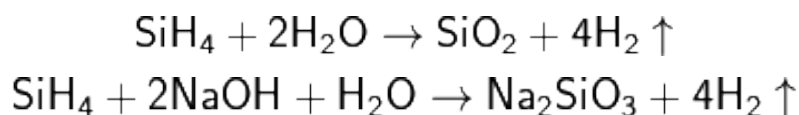
В состав замасливателей входят такие вещества, как парафин, канифоль и поверхностно-активные вещества, которые ухудшают смачивание поверхности волокна, что отрицательно влияет на структуру поверхностного слоя полимеров. Кроме того, входящие в состав замасливателей полярные соединения с различными активными группами могут взаимодействовать с реакционно-способными группами на поверхности наполнителя, препятствуя образованию прочных связей полимера с наполнителем [130-133].

Для поверхностной модификации волокон иногда производят их термохимическую обработку, которая заключается в удалении текстильного замасливателя, и последующую пропитку водными растворами специальных химических соединений - аппретов [128, с. 220]. Однако, данные операции являются дорогостоящими и ухудшающими прочностные свойства волокон, поэтому для пластиков чаще применяют препараты, разработанные с использованием прямых замасливателей. Такие аппретовые составы, в состав которых входят гидрофобно - адгезионные вещества, способствуют созданию прочной связи на границе раздела «полипропиленовое волокно - цементный камень». Кроме того, повышение адгезии к полимеру после термической и электрохимической обработки его поверхности обусловлено не только появлением на поверхности активных функциональных групп, но и удалением загрязнений, создающих ослабленную зону [129].

Наиболее эффективными в качестве замасливателей считаются соединения с ненасыщенными связями, содержащие концевую или внутреннюю двойную связь. К таким веществам относятся кремнийорганические соединения.

При изучении особенностей производства волокон выяснилось, что наибольшее распространение среди замасливателей полипропиленовой фибры получил прямой водосовместимый кремнийорганический замасливатель 4С (на основе неионогенных ПАВ, ненасыщенной эпоксидной эмульсии и аminosилана) [79, пр. Б; 80; 81].

Определено [82], что моносиланы устойчивы в нейтральной среде, но легко гидролизуются даже в присутствии малейших следов OH^- -ионов:



Характерной особенностью гидролиза гидридов (на примере тетрагидрида кремния SiH_4) является выделение водорода (H_2). Реакция протекает по окислительно-восстановительному механизму полностью и необратимо. Количество выделенного водорода пропорционально количеству прореагировавшего моносилана, и, следовательно, возрастает при увеличении расхода замасливателя с повышением расхода фибры в бетоне.

Стоит отметить, что данные уравнения химических реакций хоть и позволяют определить количество прореагировавшего и образованного вещества, однако нет точной информации о продолжительности реакций и о количестве выделяемого водорода в ходе реакций гидролиза тетрагидрида кремния. Учитывая сложный химический состав замасливателя трудно установить, какой из его компонентов гидролизуются, а какие - не вступают в реакцию или изменяют свое агрегатное состояние. А между тем выделение водорода при химической реакции может происходить как во время приготовления смеси, так и в период набора прочности фибробетона. Таким образом, повышение пористости от эффекта газообразования при экстракции аппретов может влиять на общую пористость бетона и в конечном счете на его морозостойкость.

3.4 Микроструктура цементного камня с модифицирующими добавками

Химический состав микрокремнезема, его удельная поверхность и расход влияют на структурно - механические процессы, характер и кинетику гидратации многокомпонентного вяжущего, тип и состав новообразований и являются факторами, обуславливающими особенности протекания физико - химических процессов в условиях температурного воздействия.

Изучение и сравнение процессов фазообразования в системе «цемент - микрокремнезем» в интервале температур 20—1100 °С проводили на гидратированных смесях простого вяжущего (цемент) с В/Ц=0,25 и модифицированного (цемент+микрокремнезем+гиперпластификатор) с В/Ц=0,165 при соотношении добавок: МК = 8 % от МКВ, ГП = 0,5 % от МКВ после 28-и суток твердения на воздухе и после обжига при 1100 °С с выдержкой 3 часа. Исследования проводились с использованием рентгенофазового анализа (РФА) на дифрактометре ДРОН - 3. Дифрактограммы гидратированных обычных и модифицированных вяжущих и их минералогические составы приведены на рисунках 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3 и 3.4.4.

Минералогический состав цементного камня из обычного вяжущего (цемента) (рис. 3.4.2.) представлен алюминаткальциевыми кристаллогидратами CAH_{10} ($d(\text{Å})$ - 3,74), C_2AH_8 ($d(\text{Å})$ - 2,71, 2,57), C_3AH_6 ($d(\text{Å})$ - 3,74, 2,57, 1,68), AH_3 ($d(\text{Å})$ - 2,39, 1,52, 1,46) и несвязанными в гидраты моноалюминатом кальция CA ($d(\text{Å})$ - 2,89, 2,57, 2,55, 2,14, 1,9), диалюминатом кальция CA_2 ($d(\text{Å})$ - 3,03, 2,55, 2,02, 1,94, 1,74) и $\alpha\text{-Al}_2O_3$ ($d(\text{Å})$ - 1,43, 1,3). При анализе составе модифицированного вяжущего (Ц+МК+ГП) (рис. 3.4.4.) отмечено снижение интенсивности дифракционных максимумов CA ($d(\text{Å})$ - 2,95, 2,57, 2,14, 1,89) при одновременном увеличении количества пиков алюмогеля AH_3 ($d(\text{Å})$ - 3,74, 2,27, 1,66) и кристаллогидратов CAH_{10} ($d(\text{Å})$ - 3,74, 2,55, 2,14, 1,52), C_2AH_8 ($d(\text{Å})$ - 2,71, 2,57, 1,73), C_3AH_6 ($d(\text{Å})$ - 3,74, 2,55, 1,61), что обусловлено ускорением процессов гидратации цемента в присутствии микрокремнезема.

Наличие микрокремнезема в составе модифицированного вяжущего определяет интенсивное образование структур низкоосновных гидросиликатов

кальция CSH и CASH ($d(\text{Å})$ - 1,89, 1,77, 1,73) и появление пиков α - кварца ($d(\text{Å})$ – 2,55) низкой интенсивности.

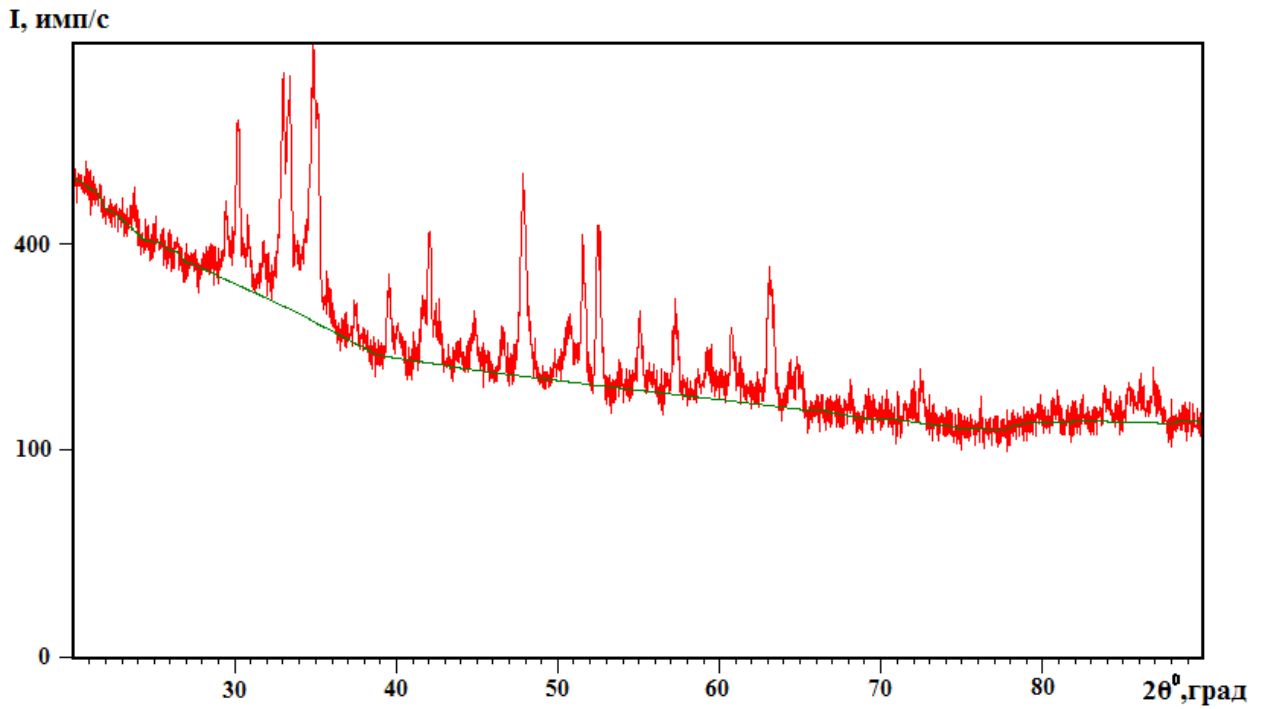


Рис. 3.4.1. – Дифрактограмма цементного камня из обычного вяжущего (Ц)

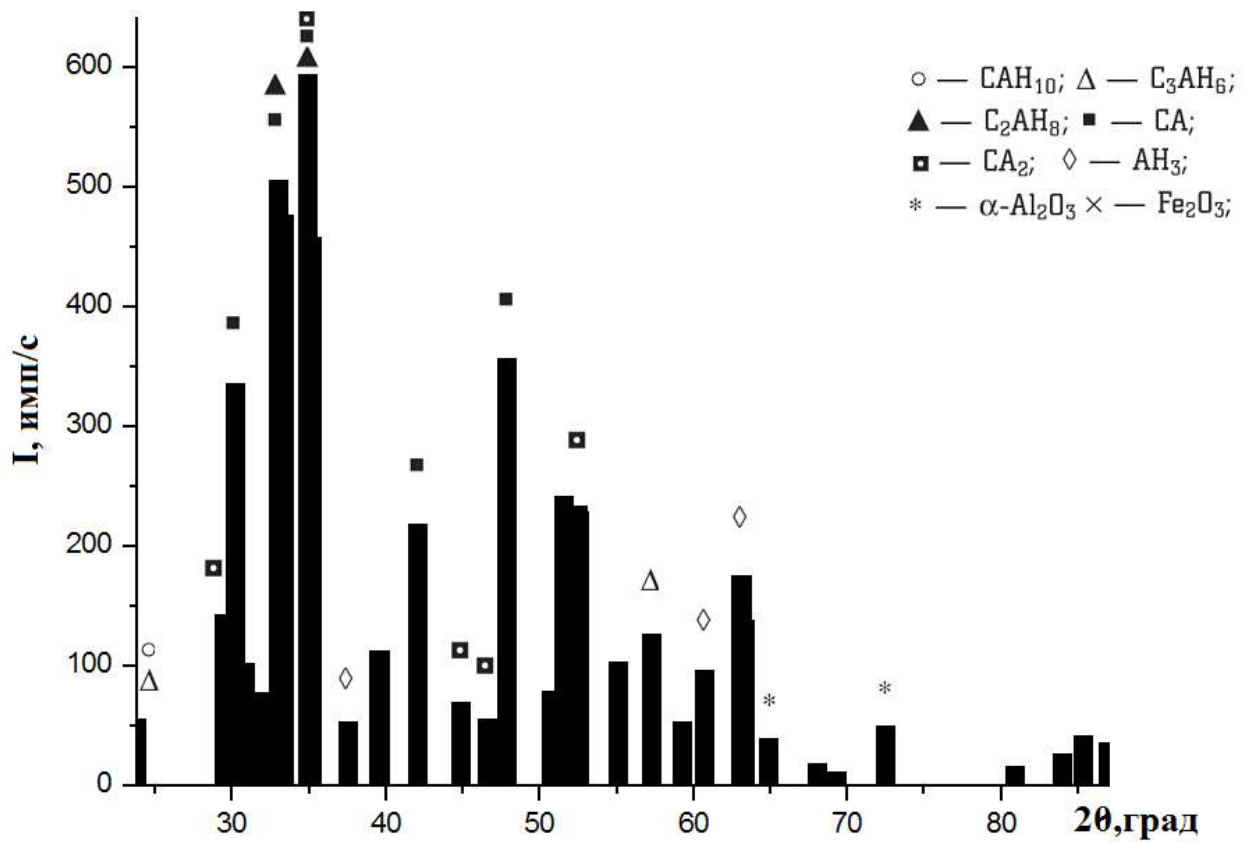


Рис. 3.4.2. – Дифрактограмма и минералогический состав цементного камня из обычного вяжущего (Ц)

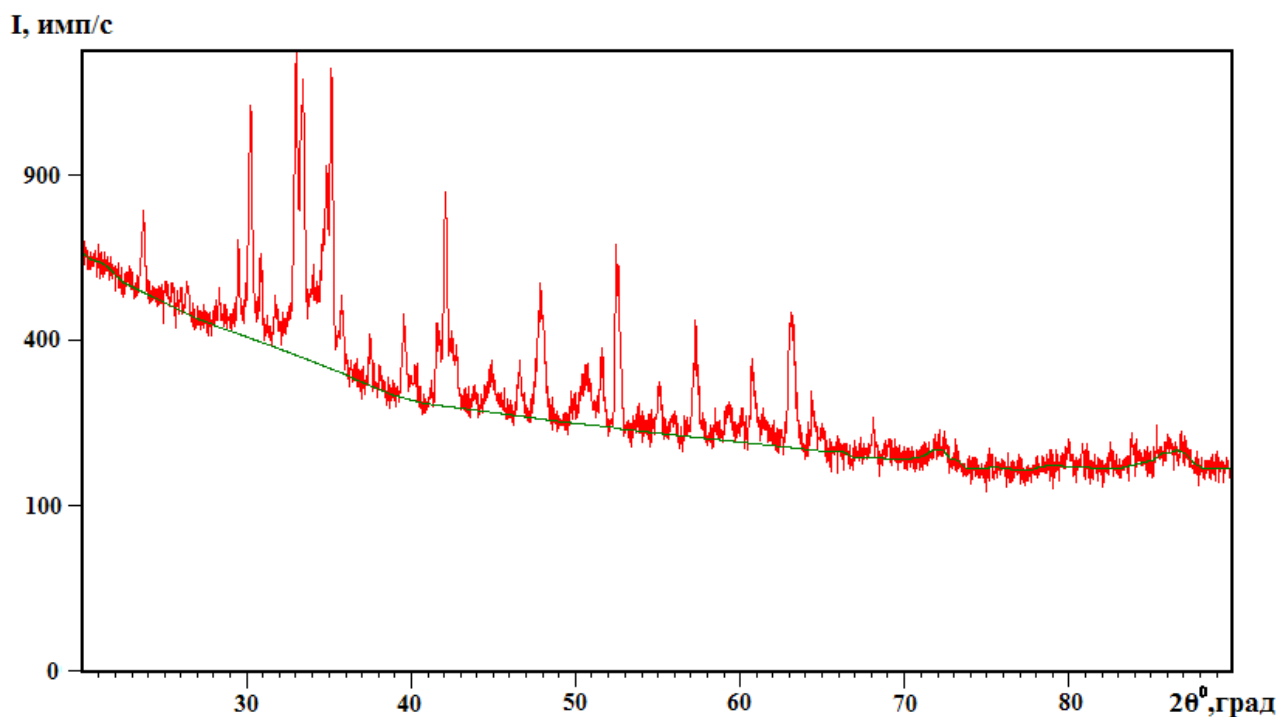


Рис. 3.4.3. – Дифрактограмма цементного камня из модифицированного вяжущего (Ц+МК+ГП)

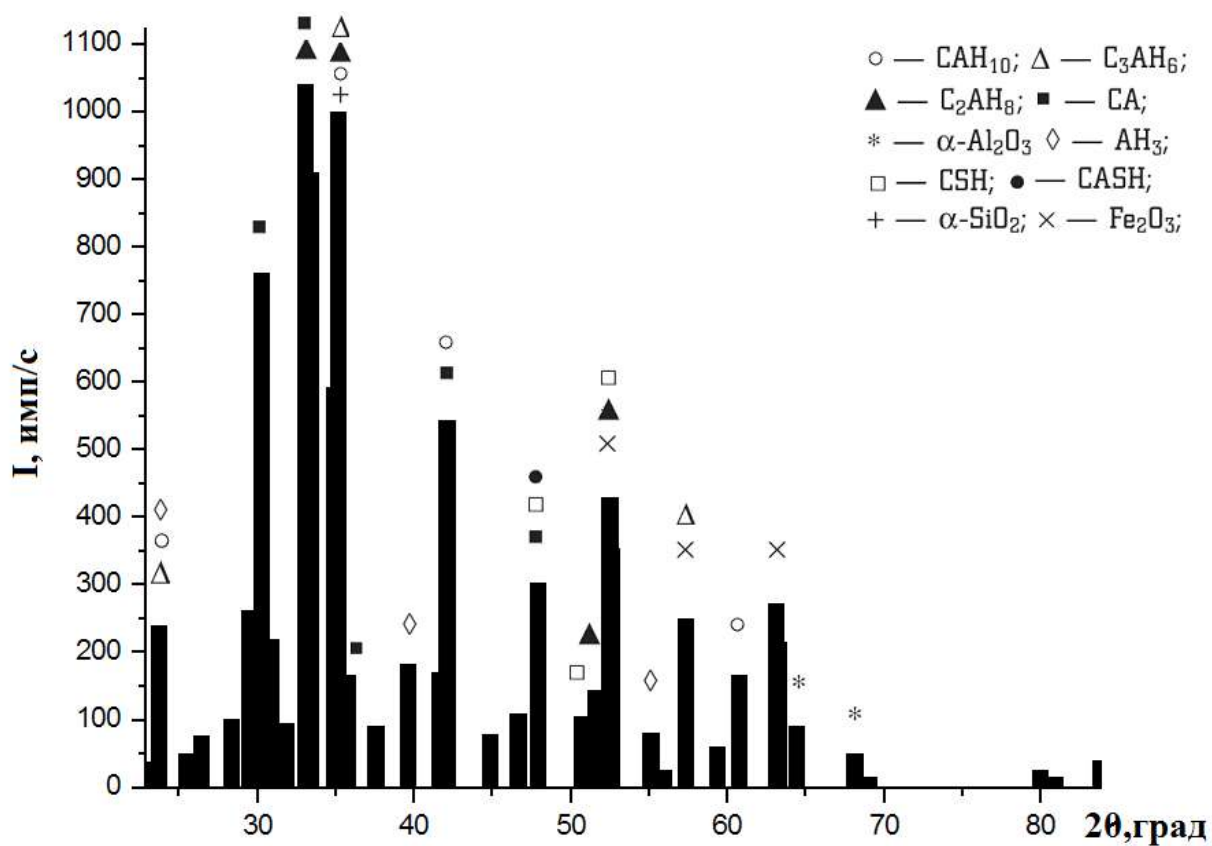


Рис. 3.4.4. – Дифрактограмма и минералогический состав цементного камня из модифицированного вяжущего (Ц+МК+ГП)

Комплексное воздействие МК и ГП на цементную систему выражается в том, что на ранней стадии структурообразования, в пластичном состоянии, система обретает повышенную вязкость и связность и характеризуется ярко выраженной тиксотропностью, а на поздних стадиях модифицированный цементный камень характеризуется особым качественным химическим составом и особой геометрией структуры. Таким образом, модифицированные с помощью микрокремнезема и поликарбоксилатных соединений цементные системы соответствуют теоретическим представлениям о бетонах высокой и сверхвысокой прочности, низкой проницаемости, повышенной коррозионной стойкости и долговечности.

Особенности формирования и усиления контактной зоны «цементный камень-волокно» рассмотрены в работах [56; 84]. Отмечено, что образование кристаллического сростка цементного камня в стесненных условиях на границе между матрицей и волокнами может привести к трансформации конфигурации этого сростка, в том числе к направленной геометрии распределения кристаллов в его структуре сростка, создавая «эффект самоармирования» бетонной матрицы.

На рисунке 3.4.5 схематически показана контактная зона со сформированными слоями новообразований вокруг волокна.

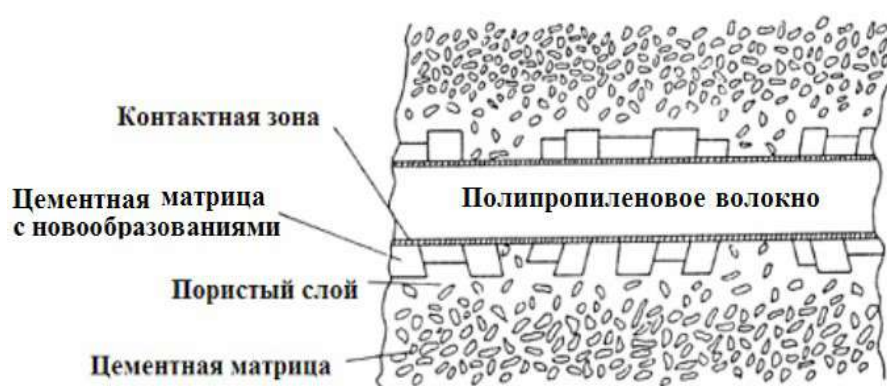


Рис. 3.4.5. - Контактная зона цементного камня и волокна

На границе контактной зоны бетонной матрицы и фибры положительный эффект вносит микрокремнезем, сокращающий в бетоне водоотделение, вызывающее под частицами заполнителя образование водных прослоек [83]. Микрокремнезем поглощает излишки воды и уплотняет структуру, снижая пористость и улучшая прочность контактной зоны. При интенсивном

формировании новообразований вследствие более глубокой гидратации вяжущего происходит упрочнение структуры модифицированного цементного камня и повышение анкеровки волокон. Однако, вследствие наличия на поверхности фибры замасливающих препаратов и различных загрязнений возможно неравномерное формирование новообразований, ослабление контактной зоны и появление микродефектов.

Исследование микроструктуры модифицированных мелкозернистых фибробетонов дает возможность определить достоинства и недостатки использования модификаторов, оценить качество сформированной контактной зоны и отследить структурные изменения композита со временем.

Можно полагать, что в цементном тесте или в тщательно уплотненной мелкозернистой бетонной смеси все межзерновые пространства заполнены водой затворения. В процессе гидратации вяжущего и формирования структуры цементного камня часть воды испаряется и адсорбируется, в результате чего образуются воздушные поры. На микрофотографиях структуры обычного мелкозернистого бетона в возрасте 28 суток твердения можно увидеть разницу с модифицированным мелкозернистым фибробетоном (рис. 3.4.6 - 3.4.9). У контрольного образца (на фотографиях с увеличением в 50 раз) прослеживается неоднородная рельефная структура со значительным количеством пор неправильной формы и с рыхлой поверхностью.

Микроструктура модифицированного состава также имеет видимые дефекты в виде пор, однако они меньшего размера. Полипропиленовая фибра сдеформирована от разрушенного бетона при испытании на раскалывание, вырванных из матрицы волокон не обнаружено.

Однако, при увеличении в 500 раз структура модифицированного мелкозернистого фибробетона резко отличается от обычного МЗБ и представляется более слитной. Стекловидность материала обусловлена наличием диоксида кремния полиморфных модификаций и новообразованиями, что подтверждается данными рентгенофазового анализа.



Рис. 3.4.6. - Микроструктура обычного мелкозернистого бетона (x50)

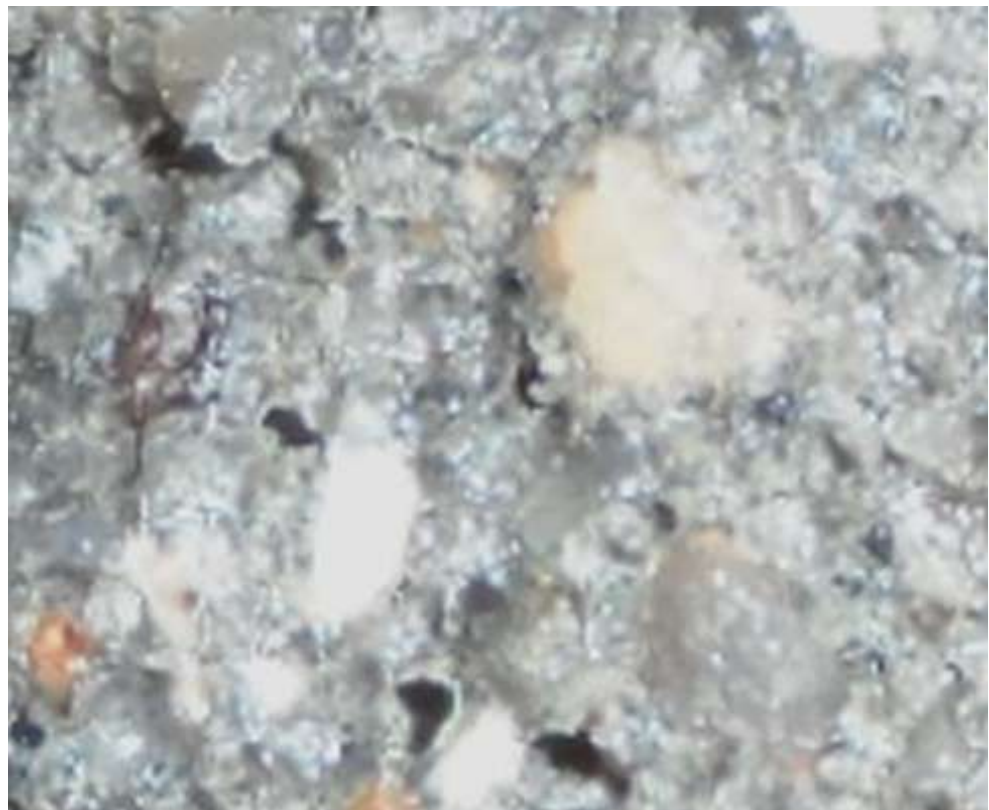


Рис. 3.4.7. - Микроструктура обычного мелкозернистого бетона (x500)



Рис. 3.4.8. - Микроструктура модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй (x50)



Рис. 3.4.9. - Микроструктура модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй (x500)

Особенности формирования структуры модифицированного мелкозернистого фибробетона обусловлены уникальными свойствами модифицирующих компонентов и их взаимодействиями друг с другом. Анализ полученных данных в работе и исследований других ученых позволили разработать принципиальные схемы воздействия каждого модифицирующего компонента в отдельности на свойства бетона. На рисунке 3.4.10 представлена схема механизмов взаимодействия микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры и их влияния на формирование структуры композита. На рисунке 3.4.11 показана схема влияния модифицирующих компонентов на технологические, прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов (т.е. на макроуровне).



Рис. 3.4.10. – Схема механизмов взаимодействия модифицирующих компонентов

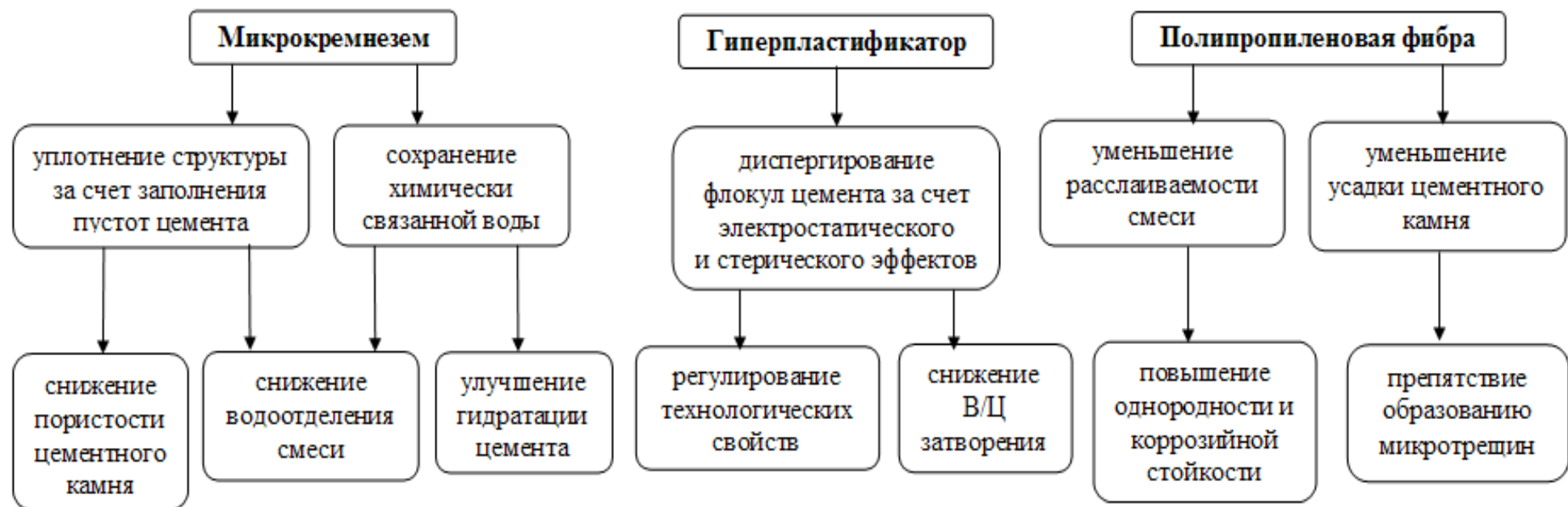


Рис. 3.4.11. – Схемы влияния модифицирующих компонентов на технологические, прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов

Таким образом, по полученным рентгенофазовым анализам, микрофотографиям и разработанным схемам влияния и взаимодействия можно сделать следующие выводы:

- использование микрокремнезема в составе многокомпонентного вяжущего способствует образованию полиморфных модификаций оксида кремния и низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H (I) при снижении доли гидроксида кальция $\text{Ca}(\text{OH})_2$;

- при введении микрокремнезема уплотняется структура цементного камня и повышается анкеровка полипропиленовой фибры, которая является подложкой для формирования кристаллических сростков, за счет образования вокруг волокон новообразований;

- гиперпластификатор создает адсорбционные оболочки, которые улучшают смачиваемость волокон, ускоряют гидратацию цемента, сглаживают поверхность наполнителей и уменьшают их трение между собой, улучшая реологические и технологические свойства смеси;

- совместное взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры повышает седиментационную и коагуляционную стойкость системы, создает условия для ускоренного набора прочности и увеличения степени гидратации цемента со временем;

- при термических воздействиях, деформациях усадки при твердении и работе в условиях попеременного высыхания и увлажнения модифицирующие компоненты снижают внутренние напряжения в бетоне, предупреждают микротрещинообразование и сохраняют эксплуатационные характеристики;

- модифицирующие компоненты улучшают микро- и макроструктуру цементного камня, повышая прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства композита.

Выводы по 3-й главе:

1. Проанализированы способы производства микрокремнезема в виде порошка и суспензий. Установлено, что МКУ-85 наиболее предпочтителен с точки зрения удобства транспортировки, хранения и применения.

2. Исследовано влияние мелкого заполнителя на свойства мелкозернистых бетонов. Показано, что расход и технические свойства песка влияют на реологические и технологические показатели качества смеси. Наиболее экономичными являются мелкозернистые бетоны на крупных песках с П/Ц = 2÷4, при использовании мелких песков оптимальными будут составы с П/Ц = 1÷1,5.

3. Получены уравнения площади поверхности и модуля поверхности элементарного полипропиленового волокна. Доказано, что длина волокна незначительно влияет на прочностные характеристики композита. Наиболее эффективны длинные волокна, так как они имеют более сильную анкеровку и защемление, что позволяет им противостоять выдергиванию из матрицы и максимально реализовывать свои прочностные свойства, а так же за счет длины создавать «эффект обоймы», работать совместно с другими волокнами и противостоять растягивающим деформациям в любой точке разрушения.

4. Установлено, что полипропиленовая фибра снижает подвижность смеси и повышает количество вовлеченного воздуха. Доказано влияние замасливателей волокон на формирование контактной зоны и пористости цементного камня. Экстракция аппретов термическими способами позволяет улучшить контактную зону цементного камня и волокна.

5. Произведен рентгенофазовый анализ и получены дифрактограммы цементного камня обычного и модифицированного вяжущего. Определены их минералогические составы и доказано формирование более слитной и однородной структуры композита за счет новообразований.

6. Разработаны обобщенные схемы взаимодействия и влияния модифицирующих компонентов на процессы формирования структуры, технологические, прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов.

Глава 4. Технологические свойства фибробетонных смесей, особенности структурообразования, набора прочности и усадки мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

4.1 Технологические свойства многокомпонентного вяжущего

Важными условиями для получения бетонов и фибробетонов с высокими эксплуатационными характеристиками являются оптимизация составов, способы приготовления и транспортировки смеси и технология укладки или формовки. Для избежания расслоения, обеспечения однородности смеси и равномерного распределения фибры по всему объему следует оптимизировать реологические и технологические свойства готовой смеси.

На технологические показатели качества фибробетонных смесей в значительной степени влияют: свойства основных материалов (цемент, песок), виды и расходы микронаполнителя, химических добавок и фибры. Изучение взаимодействия всех компонентов смеси друг с другом будет основываться на сравнении составов и свойств обычных и модифицированных бетонов и фибробетонов.

Мелкозернистый бетон отличается от тяжелого более однородным составом и структурой. Введение микрокремнезема позволяет уплотнить цементный камень и усилить контактную зону с наполнителями. Недостатком микрокремнезема является его высокая водопотребность ($V_{\text{МК}} > 85 \%$ при удельной поверхности $S_{\text{уд}} = 24...25 \text{ м}^2/\text{г}$ - по данным ртутной порометрии). Так доказано [2], что негативное влияние избыточного количества воды проявляется при дозировке МК выше 15 % общей массы вяжущего при соответствующем увеличении воды затворения бетонной смеси более чем на 25 %.

В данных исследованиях получена зависимость, позволяющая определить расход воды затворения смеси V_3 без химических добавок с учетом водопотребности компонентов:

$$V_3 = 0,01 \cdot (Ц \cdot НГ_{\text{ЦТ}} + П \cdot V_{\text{П}}) \cdot 1,019^{\text{МК}}, \quad (4.1.1)$$

где Ц - расход цемента, $\text{кг}/\text{м}^3$; $НГ_{\text{ЦТ}}$ – нормальная плотность цементного теста,

%; П – расход песка, кг/м³; В_п – водопотребность песка, %; МК – расход микрокремнезема, % от общей массы вяжущего.

С помощью уравнения 4.1.1 установлена взаимосвязь между расходом цемента и микрокремнезема и водой затворения, что очень важно при исследовании водовяжущего отношения в равноподвижных смесях, а также при подборе и проектировании составов.

Плотность и водопотребность цемента и микрокремнезема в значительной степени отличаются друг от друга, аналогичные же показатели многокомпонентного вяжущего будут изменяться прямолинейно в зависимости от расхода микрокремнезема (рис. 4.1.1).

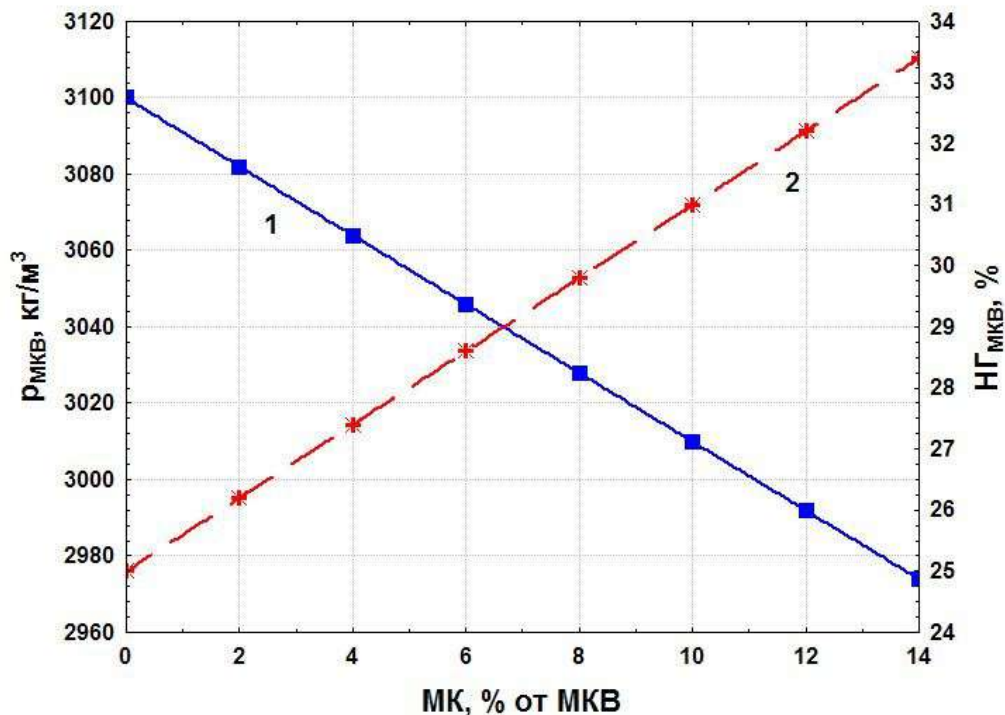


Рис. 4.1.1. - Зависимости изменения свойств многокомпонентного вяжущего от расхода МК: 1 – истинной плотности; 2 – нормальной густоты.

Из зависимости 2 (рис. 4.1.1) следует, что в обычных смесях при дозировке МК от 0 до 14 % нормальная густота вяжущего увеличивается на 33 % при соответствующем повышении водовяжущего отношения (В/В) с 0,43 до 0,51. То есть, применение микронаполнителя свыше 6 % от общей массы вяжущего в бетонах с особыми требованиями по эксплуатационной надежности без водоредуцирующих добавок недопустимо. Зависимость 1 (рис. 4.1.1) показывает,

что плотность МКВ снижается пропорционально количеству замещенного цемента микрокремнеземом. Следовательно, объем многокомпонентного вяжущего будет также уменьшаться в связи с заполнением частицами МК пустот цемента. Это подтверждается анализом изополя изменения плотности равноподвижных смесей (расплыв конуса 105-116 мм) в зависимости от расхода микрокремнезема (рис. 4.1.2).

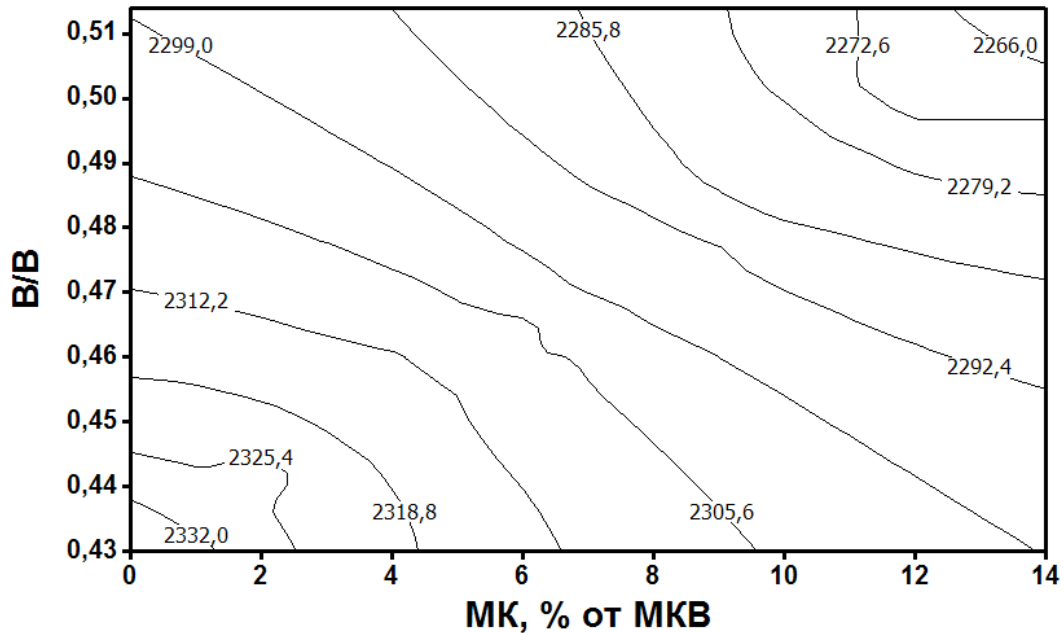


Рис. 4.1.2. - Изополе изменения плотности равноподвижных бетонных смесей в зависимости от расхода МК при В/В = 0,43 ÷ 0,514.

При исследовании графиков (рис. 4.1.1) получены следующие уравнения прогнозирования плотности и нормальной густоты многокомпонентного вяжущего как важнейших показателей при проектировании составов бетона:

$$\begin{cases} \rho_{МКВ} = \rho_{Ц} - 0,01 \cdot МК \cdot (\rho_{Ц} - \rho_{МК}) \\ НГ_{МКВ} = НГ_{ЦТ} + 0,6 \cdot МК \end{cases} \quad (4.1.2)$$

где $\rho_{Ц}$, $\rho_{МК}$ - истинные плотности цемента и микрокремнезема, кг/м³; $НГ_{МКВ}$ - нормальная густота многокомпонентного вяжущего, %.

В работе [85] отмечено, что в равноподвижных смесях на каждый килограмм введенного в смесь микрокремнезема расход воды возрастает на 1 литр. В связи с этим, применение гиперпластификатора как эффективного модификатора структуры позволит уменьшить водовяжущее отношение при приготовлении бетонов и фибробетонов на основе МКВ с высокой водопотребностью.

4.2 Технологические свойства мелкозернистых бетонов при разных соотношениях между песком и цементом

Повышение доли песка, оцениваемое критерием П/Ц, в мелкозернистом бетоне влияет в значительной степени на водопотребность, плотность и воздухововлечение смеси. При увеличении П/Ц снижается объемная концентрация цементного теста, которая складывается из абсолютного объема цемента и воды. Данная структурная характеристика, учитываемая в конце периода формирования структуры бетона, определяется по формуле [37, с. 35]:

$$C = \frac{\text{Ц}}{1000} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{Ц}}} + \left(\frac{B}{\text{Ц}} \right)_{\text{ист}} \right), \quad (4.2.1)$$

где $(B/\text{Ц})_{\text{ист}}$ – истинное водоцементное отношение бетона.

Объемная концентрация цементного теста выражает соотношение между цементным камнем и наполнителем и может быть принята в качестве параметра макроструктуры. Уравнение 4.2.1 справедливо также для определения объемной концентрации цементного теста на основе многокомпонентного вяжущего.

Истинное водовязущее отношение $(B/V)_{\text{ист}}$ или W определяется из условия, что водопотребность заполнителя $V_{\text{зАП}}$ выделяется из общего количества воды затворения V и учитывается как составная часть бетонной смеси:

$$W = (B - V_{\text{зАП}}) / \text{Ц} \quad (4.2.2)$$

Следовательно, для управления свойствами бетонной смеси и фибробетона, а также при проектировании их составов, можно применять единые аргументные характеристики C и W , что позволяет широко использовать для этих целей компьютерные программы [38, с. 16]. При назначении в расчетах постоянных данных объемной концентрации цементного теста появляется возможность анализировать технологические свойства смеси и прочность бетона при варьировании величин W и воды затворения смеси V .

Влияние песка на изменение водоцементного отношения и объемной концентрации цементного теста на примере равноподвижных смесей (расплыв конуса 105-116 мм) показаны на рисунке 4.2.1.

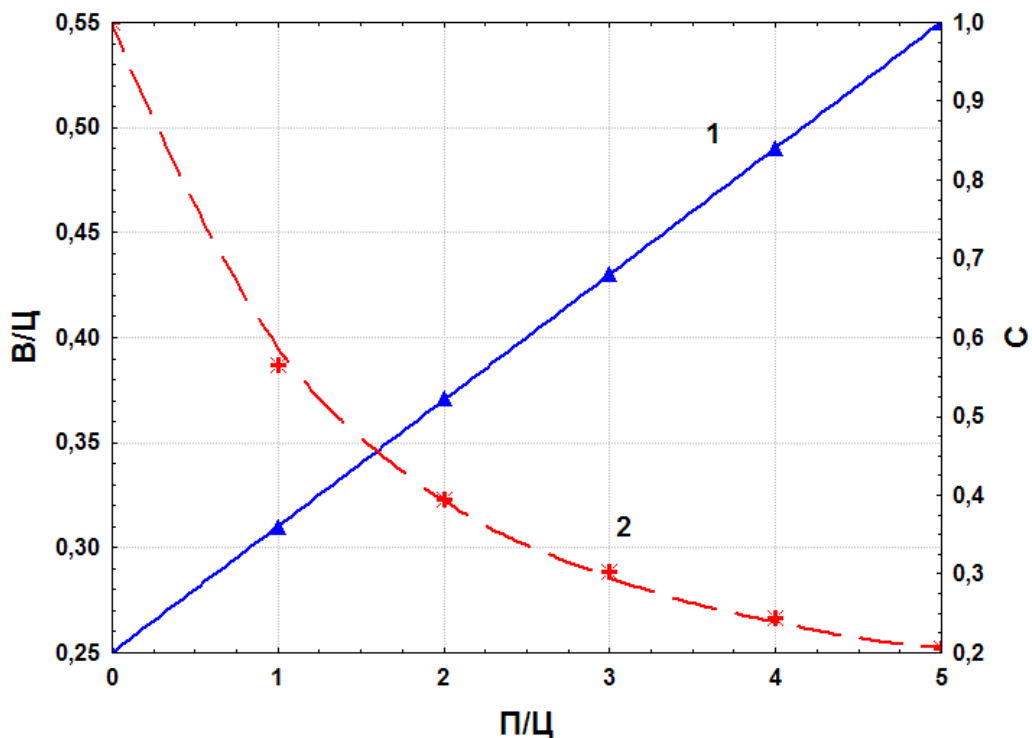


Рис. 4.2.1 - Графики изменения свойств бетонной смеси от показателя П/Ц:
1 – водоцементного отношения; 2 – объемной концентрации цементного теста.

Согласно зависимости 1 (рис. 4.2.1) водоцементное отношение смеси возрастает с увеличением доли песка прямолинейно. Значение данного показателя может быть определено по формуле:

$$B / Ц = 0,01 \cdot (HГ_{цт} + B_{п} \cdot П / Ц), \quad (4.2.3)$$

Зависимость 2 (рис. 4.2.1) показывает, что объемная концентрация цементного теста резко снижается при увеличении П/Ц, что в конечном счете напрямую влияет на прочностные показатели бетона. Объемная концентрация цементного теста в смесях с разным П/Ц будет определяться уравнением:

$$C = 0,558 - 0,518 \cdot \log_{10} П / Ц \quad (4.2.4)$$

Таким образом, эффективность применения химических добавок будет снижаться в связи с уменьшением доли цемента в смеси, так как поликарбоксилаты не являются поверхностно-активными веществами и имеют слабо выраженную смачивающую способность по отношению к тонкодисперсному минеральному наполнителю и заполнителю. При соотношениях между песком и цементом в диапазоне П/Ц=1 ÷ 5 прогнозирование

прочностных и эксплуатационных свойств мелкозернистого бетона осуществляется по различным закономерностям.

С применением многокомпонентных вяжущих плотность мелкозернистого бетона также будет изменяться в зависимости от расхода микрокремнезема и песка. Изменение плотности смесей при разных соотношениях П/Ц и расходах МК показаны на рисунке 4.2.2.

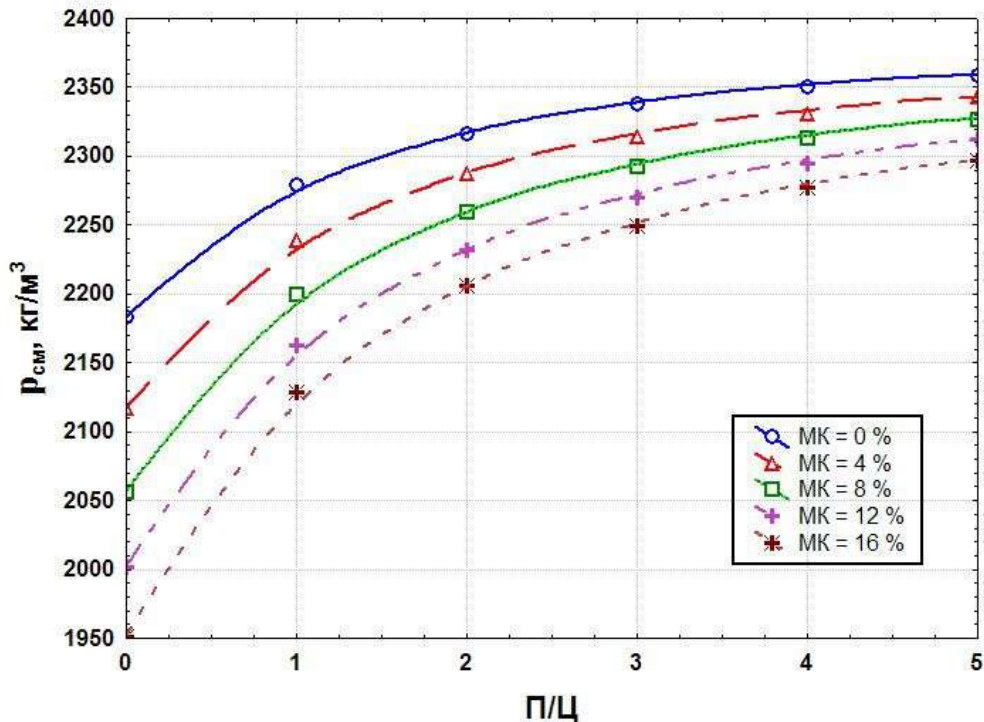


Рис. 4.2.2 - Изменение плотности бетонной смеси при разных П/Ц и МК.

Уменьшение плотности смеси при снижении П/Ц объясняется уменьшением доли вяжущего с большей истинной плотностью, чем у песка, и увеличением воды затворения до 63 % (при сравнении П/Ц=1 и П/Ц=5 при МК=0 %).

Согласно полученным данным плотности смесей (рис. 4.2.2) при разных соотношениях между песком и цементом будут определяться уравнениями:

$$\rho_{см} = 2280,92 + 114,85 \cdot \log_{10} \Pi / \text{Ц} - \text{для МК} = 0 \% \quad (4.2.5)$$

$$\rho_{см} = 2240,47 + 150,54 \cdot \log_{10} \Pi / \text{Ц} - \text{для МК} = 4 \% \quad (4.2.6)$$

$$\rho_{см} = 2201,92 + 183,71 \cdot \log_{10} \Pi / \text{Ц} - \text{для МК} = 8 \% \quad (4.2.7)$$

$$\rho_{см} = 2165,32 + 214,37 \cdot \log_{10} \Pi / \text{Ц} - \text{для МК} = 12 \% \quad (4.2.8)$$

$$\rho_{см} = 2130,54 + 242,73 \cdot \log_{10} \Pi / \text{Ц} - \text{для МК} = 16 \% \quad (4.2.9)$$

Очевидно, что плотность равноподвижных смесей возрастает в связи с увеличением доли песка и уменьшением воды затворения до 52 % (при сравнении П/Ц=0 и П/Ц=3 при МК=0 %).

4.3 Технологические свойства мелкозернистых бетонов с полифункциональной добавкой - гиперпластификатором

В данных исследованиях применялся жидкий гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, концентрация и водоредуцирующая способность которого учитывалась при определении количества воды затворения модифицированных бетонных и фибробетонных смесей.

Критерием эффективности водоредуцирующих добавок является уменьшение расхода воды ΔB [86].

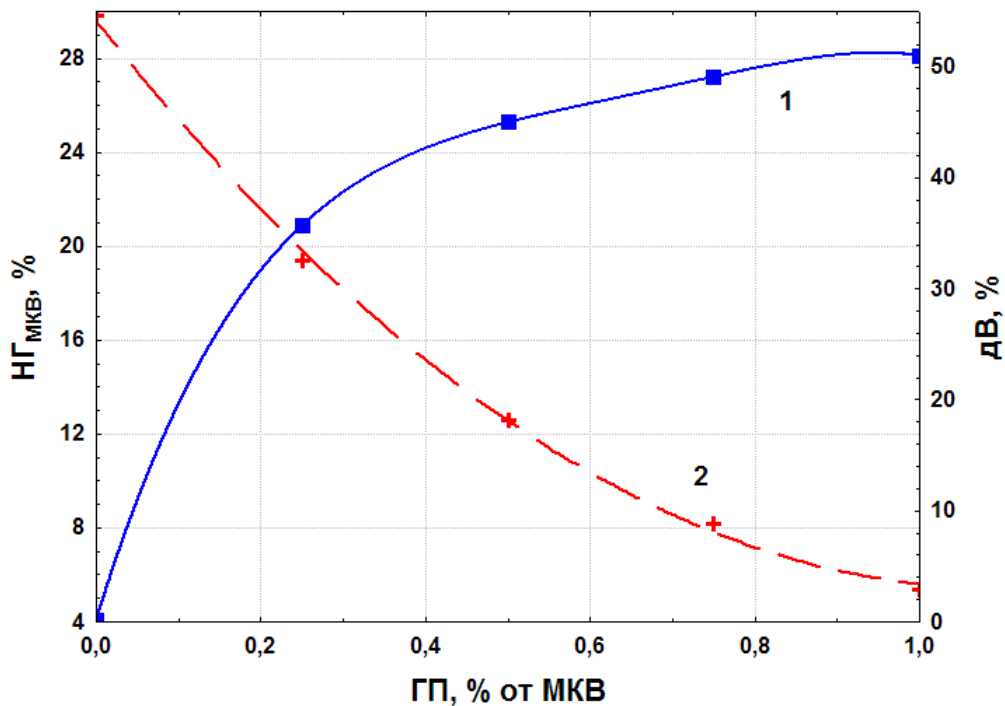


Рис. 4.3.1. - Зависимости изменения свойств многокомпонентного вяжущего от количества ГП: 1 – расхода воды; 2 – нормальной плотности.

Зависимости изменения расхода воды ΔB (%) и нормальной плотности многокомпонентного вяжущего (Ц+МК=92%+8%) (рис. 4.3.1) показывают, что водоредуцирующая способность гиперпластификатора позволяет снизить расход воды затворения до 50 %, при этом консистенция цементного теста сохраняется даже при снижении нормальной плотности. При анализе графиков 1 и 2

установлены зависимости, позволяющие прогнозировать уменьшение расхода воды затворения и нормальную густоту многокомпонентного вяжущего:

$$\begin{cases} \Delta B = 2,77 - 82,97 \cdot ГП^2 + 129,05 \cdot ГП \\ НГ_{МКВ} = 29,59 + 20,11 \cdot ГП^2 - 44,11 \cdot ГП \end{cases} \quad (4.3.1)$$

где ГП – расход гиперпластификатора в перерасчете на сухое вещество, % от общей массы вяжущего.

Непосредственное влияние химической добавки на водовяжущее отношение характеризуется коэффициентом влияния гиперпластификатора $k_{ГП}$ – безразмерным коэффициентом, равным отношению расхода воды затворения с гиперпластификатором к расходу воды затворения равноподвижного контрольного состава без добавки. Взаимосвязь между коэффициентом $k_{ГП}$ и расходом ГП для равноподвижных жестких смесей ($OK=0$) будет определяться зависимостями [87, с. 38]:

$$\begin{cases} k_{ГП} = 0,481 - 0,272 \cdot \log_{10} ГП \\ k_{ГП} = 1 - 2,95 \cdot ГП^3 + 4,51 \cdot ГП^2 - 2,375 \cdot ГП \end{cases} \quad (4.3.2)$$

По результатам лабораторных исследований установлено, что наилучшие показатели уменьшения расхода воды затворения смесей достигнуты при введении ГП от 0,25 до 0,75 % от массы вяжущего. При расходе добавки от 0,9 до 1 % значительно увеличились сроки схватывания модифицированного вяжущего и снизилась прочность композита [88].

При расчете составов фибробетонов с заданной удобоукладываемостью ориентировочный расход гиперпластификатора определяется с учетом его коэффициента влияния k_{inf} по формуле:

$$ГП = 10^{k_{inf}}, \quad (4.3.3)$$

k_{inf} – коэффициент влияния гиперпластификатора (по таблице 4.3.1).

Использование структурных характеристик также позволяет получать уточненные зависимости «подвижность – состав бетонной смеси – свойства материалов» при значительных колебаниях состава смеси и свойств исходных материалов [89].

Значение коэффициента влияния добавки на удобоукладываемость в зависимости от марки смеси по осадке конуса и жесткости

Удобоукладываемость по показателям		Коэффициент влияния добавки k_{inf}
подвижности, ОК, см	жесткости, Ж, с	
-	Ж2 11 - 20	$k_{inf} = \frac{0,224 - (B/B)_{ГП}}{0,133}$
-	Ж1 5 - 10	$k_{inf} = \frac{0,231 - (B/B)_{ГП}}{0,125}$
П1 1 - 4	-	$k_{inf} = \frac{0,359 - (B/B)_{ГП}}{0,074}$
П2 5 - 9	-	$k_{inf} = \frac{0,361 - (B/B)_{ГП}}{0,084}$
П3 10 - 15	-	$k_{inf} = \frac{0,37 - (B/B)_{ГП}}{0,093}$
П4 16 - 20	-	$k_{inf} = \frac{0,428 - (B/B)_{ГП}}{0,058}$
П5 более 20	-	$k_{inf} = \frac{0,444 - (B/B)_{ГП}}{0,084}$

Для оценки водоредуцирующего действия сопоставлены значения водовяжущего отношения (В/В) состава и его истинное водовяжущее отношение W в зависимости от расхода гиперпластификатора на рисунке 4.3.2.

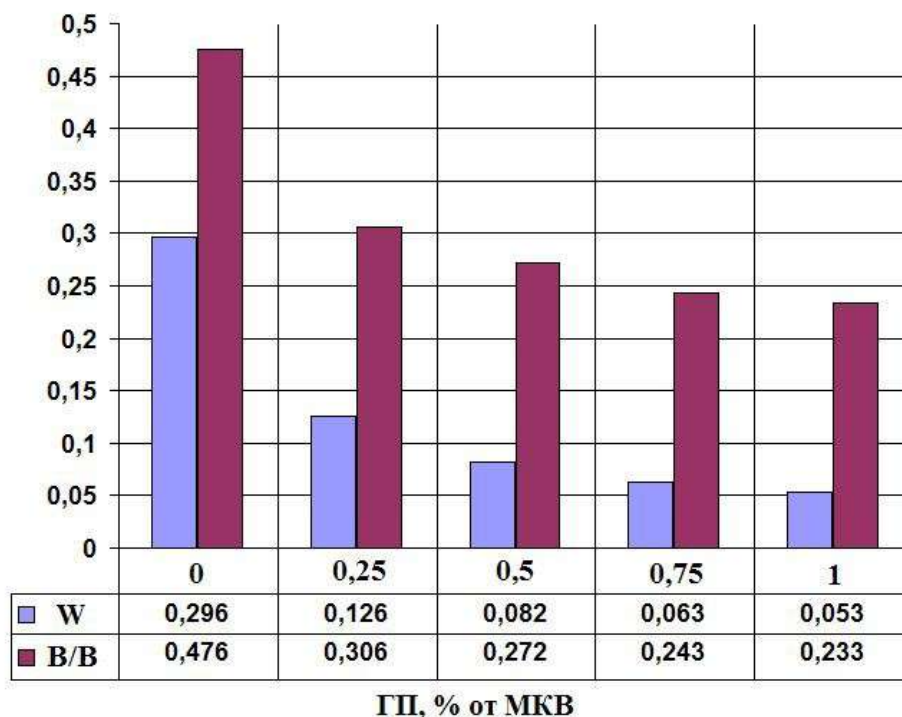


Рис. 4.3.2. – Изменение структурных характеристик В/В и W от расхода ГП.

Данные диаграммы подтверждают, что в равноподвижных смесях с МКВ (92 % цемента + 8 % микрокремнезема) благодаря диспергации флокул цемента водовязущее отношение смеси снижается с 0,476 до 0,233 при сохранении ее консистенции соответствующей нормальной густоте цемента.

Однако, ввиду недостатка воды для нормальной гидратации цемента, может возникать дефицит жидкой фазы на микроструктурном уровне, приводящий к разрушению молекулярных связей и нарушению процессов структурообразования цементного камня, что в конечном счете скажется на прочности бетона. Набор прочности бетона с низким W должен происходить в во влажной среде и сопровождаться тщательным уходом.

Для исследования влияния гиперпластификатора на технологические свойства подвижных смесей и установления взаимосвязи между ними построены изополя плотности и осадки конуса модифицированной мелкозернистой бетонной смеси (рис. 4.3.3 и 4.3.4).

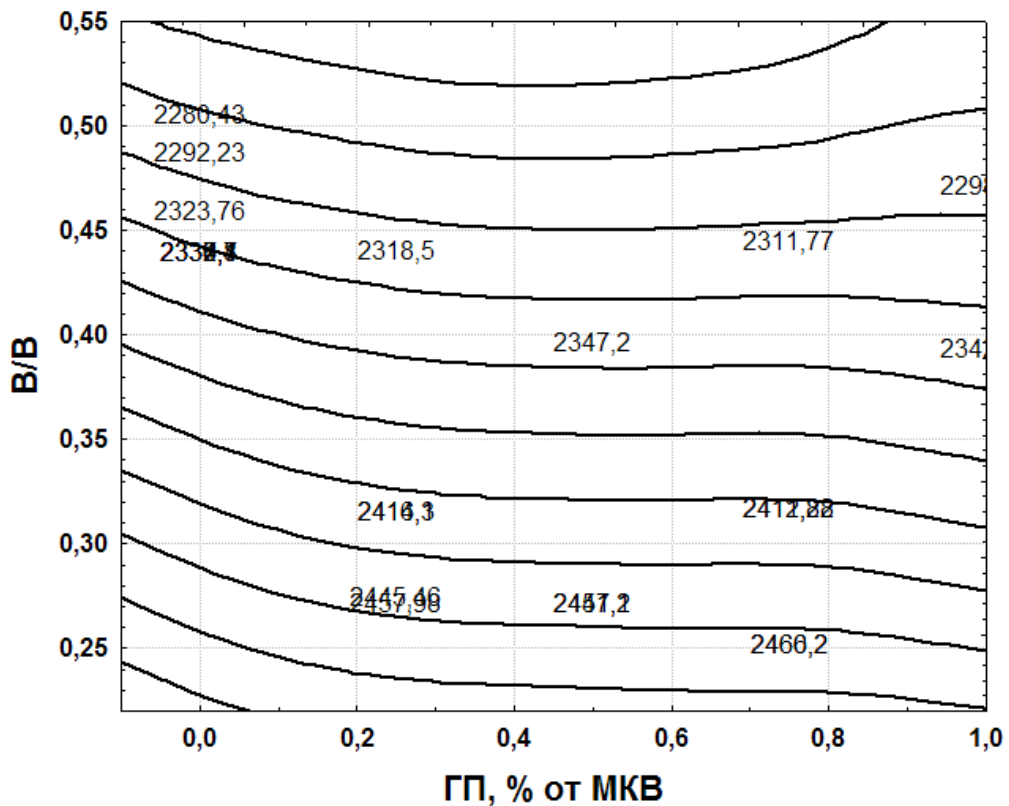


Рис. 4.3.3. - Изополе изменения плотности модифицированной бетонной смеси в зависимости от расхода ГП при $V/B = 0,233 \div 0,514$.

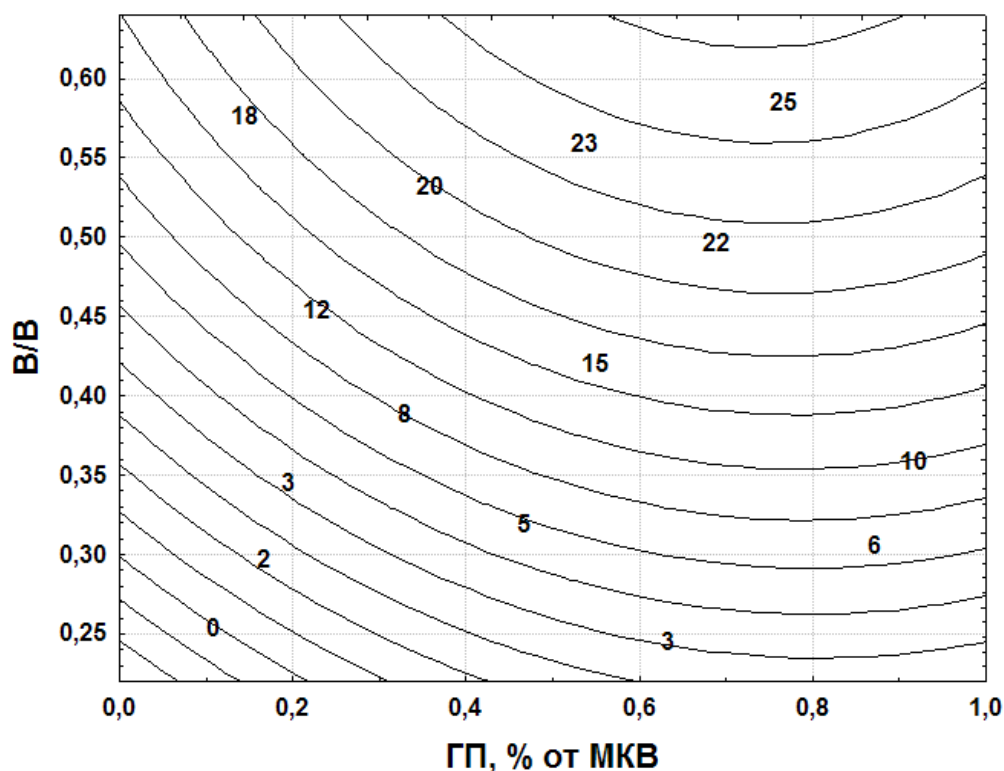


Рис. 4.3.4. - Изополе изменения осадки конуса в зависимости от расхода ГП при $V/B = 0,243 \div 0,64$.

Анализ графиков показывает четкую взаимосвязь плотности и подвижности смеси с водовяжущим отношением и расходом гиперпластификатора. Так максимальная плотность (рис. 4.3.3), обеспечивается при снижении V/B смеси и увеличении расхода добавки, обуславливающей водоредуцирующий эффект. Осадка конуса (рис. 4.3.4) изменяется прямо пропорционально как водовяжущему отношению, так и расходу ГП.

Изменения показателей плотности и подвижности (осадки конуса) модифицированной бетонной смеси, проанализированные на рисунках 4.3.3 и 4.3.4, в зависимости от водовяжущего отношения смеси и расхода гиперпластификатора описываются уравнениями 4.3.4 и 4.3.5 соответственно:

$$p = 2654,39 - 46,06 \cdot ГП - 630,81 \cdot V/B + 63,43 \cdot ГП^2 - 89,5 \cdot V/B \cdot ГП - 210,83 \cdot V/B^2 \quad (4.3.4)$$

$$OK = -43,51 + 41,99 \cdot ГП + 133,95 \cdot V/B - 24,76 \cdot ГП^2 - 8,88 \cdot V/B \cdot ГП - 72,72 \cdot V/B^2 \quad (4.3.5)$$

4.4 Технология применения полипропиленовой фибры в мелкозернистых бетонных смесях

Важным фактором для получения композитов однородной структуры является технология изготовления фибробетона, заключающаяся в рациональном проектировании составов, поэтапной загрузке компонентов смеси, контроле над их перемешиванием, правильным введением минеральных, химических добавок и фибры и выбора оптимального способа формования и укладки фибробетона.

Поскольку качество распределения волокон в бетоне предопределяет его долговечность, то вопрос совершенствования способов введения волокон и повышения однородности фибробетонной смеси остается по-прежнему актуальным. В мировой практике исследованы многочисленные способы введения в смесь волокон [90 - 92].

Однако, учитывая отсутствие специального оборудования и особенности производства фибробетонов в условиях строительной площадки, проведенные лабораторные и производственные испытания показывают, что способы введения полипропиленовой фибры должны назначаться исходя из требований к смеси по удобоукладываемости.

Рекомендуемая продолжительность перемешивания бетонных смесей регламентируется согласно ГОСТ 7473-2010 и составляет не менее 1,5 минуты. Полипропиленовую фибру в смеси можно перемешивать в любом типе смесителей (принудительного или гравитационного типа), в том числе в автобетоносмесителях. При соблюдении требований к интенсивности и продолжительности перемешивания отсутствуют проблемы, связанные с их неравномерным распределением в смеси (образованием не распределенных и перепутанных в смеси пучков волокон). Волокна рекомендуется вводить и перемешивать следующими способами:

- 1) перемешивание фибры непосредственно с сухими компонентами смеси (щебень, песок, цемент, микронаполнитель), затем введение воды затворения, водных растворов химических добавок (при расходах более 0,25 % от массы вяжущего) и окончательное смешивание до готовности. Время перемешивания фибробетонной смеси увеличивается в 2 раза.

Перемешивание с заполнителями позволяет распределять волокна равномерно по всему объему и создавать на их поверхности перфорацию и локальные скрутки и изгибы, улучшающие анкеровку в цементном камне.

2) введение волокон осуществляется после перемешивания всех сухих компонентов смеси и затворения их водой и добавления водных растворов химических добавок. После тщательного перемешивания производится введение волокна в работающий смеситель. Время смешивания увеличивается до 20 %.

Данный способ эффективен при производстве подвижных и литых смесей. Избытки воды ускоряют экстракцию аппретов с поверхности волокон, создают с ними коллоидную систему и способствуют переносу и распределению по всему объему бетона.

3) загрузка полипропиленовой фибры на заводе в автобетоносмеситель осуществляется после перемешивания бетонной смеси в «миксере». Времени доставки до места приемки и укладки фибробетонной смеси достаточно для полного диспергирования волокон.

Недостатком такого способа введения является отсутствие возможности визуального осмотра и контроля качества распределения волокон. К тому же при длительном перемешивании волокна имеют тенденции к комкованию.

4) в условиях строительной площадки в готовую бетонную смесь, доставленную автобетоносмесителем, волокна засыпают вручную по частям или дозировано в бумажных мешках порциями не более 1 кг. При этом перемешивание фибробетонной смеси увеличивается до 5 минут в зависимости от подвижности.

Такой способ введения волокон носит характер экстренности и не обеспечивает отличного распределения волокон. При укладке бетона могут появляться неперемешанные пучки ровинга.

Производственные исследования в заводских условиях показали, что при приготовлении малоподвижных и жестких смесей (П1 – Ж5) для вибропрессованных изделий полипропиленовая фибра вводится в начале перемешивания сухих или влажных компонентов смеси, через 0,5-1,0 минуты добавляется вода и смесь перемешивается еще 1,0-1,5 минуты.

При производстве подвижных смесей (П2 – П5) полипропиленовая фибра вводится в последнюю очередь (после затворения компонентов водой и тщательного перемешивания смеси не менее 1,5 минуты) и повторно перемешивается в течение 0,3-1 минуты.

4.5 Особенности формирования структуры мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Особый интерес при изучении фибробетона могут представлять данные о кинетике набора прочности на ранних сроках твердения и особенностях формирования микроструктуры цементного камня. Подобные исследования проводятся неразрушающим импульсным ультразвуковым методом. Ультразвуковой метод позволяет выявлять качество бетона в изделиях и конструкциях. Измеряя в различных частях конструкции скорость распространения ультразвука, которая тесно связана с плотностью и прочностью матрицы, можно оценить однородность бетона, не прибегая к испытанию бетонных образцов [13, с. 187].

Структура композитов образуется при схватывании смеси и последующего твердения бетона и фибробетона. Период формирования структуры определяется временем от момента затворения и формования до резкого возрастания прочности исследуемого образца. Продолжительность периода формирования структуры зависит в основном от вида, состава и свойств цемента, водоцементного отношения смеси, вида и количества минеральных и химических добавок и условий твердения [93; 94]. Повышение концентрации цементного теста сокращает сроки схватывания [89, с. 107].

Процесс формирования цементно - песчаной матрицы бетона и фибробетона можно разделить на три основных стадии:

1-я стадия – образование первоначальной матрицы из продуктов гидратации цемента. В начальном периоде процесса гидролиза основного компонента цемента - трехкальциевого силиката - выделяется гидроксид кальция, образуя пересыщенный раствор щелочей, гидроксид- и сульфат-ионов с незначительным

содержанием кремнезема, глинозема и железа. Высокая концентрация ионов наблюдается незначительное время после затворения, поскольку в течение нескольких минут из раствора осаждаются первые новообразования — гидроксид кальция и эттрингит.

2-я стадия – образование гидросиликатов кальция и замедление процесса гидратации цемента. Примерно через час наступает следующая стадия гидратации цемента, которая характеризуется образованием очень мелких гидросиликатов кальция. Поскольку реакции протекают на поверхностных слоях зерен цемента, где образуется цементный гель, то сам размер зерен цемента практически не изменяется. Появившиеся новообразования образуют флоккулы и сольватные оболочки, отчего поверхностный слой становится малопроницаем для воды на 2-6 ч. Цементное тесто под действием межчастичных сил «притяжения-отталкивания» приобретает связанность и подвижность. Вторую стадию, при которой замедляется гидратация, называют «скрытым или индукционным периодом» гидратации цемента.

3-я стадия - упрочнение структуры за счет кристаллизации новообразований матрицы. Завершение процесса гидратации цемента, характеризуемое началом кристаллизации гидроксидов и гидросиликатов кальция и эттрингита, происходит очень интенсивно. В межчастичном пространстве происходит свободный рост тонких пластинок новообразований в виде длинных волокон, которые проходят через поры, разделяются и создают пространственные связи, усиливая сцепления между зернами цемента. Так происходит уплотнение и упрочнение первоначальной матрицы, сложившейся к концу периода раннего формирования структуры. В дальнейшем происходят медленные реакции, продолжающиеся до полной гидратации цемента.

В процессе формирования структуры бетона и ее последующего твердения изменяется не только прочность бетона, но и другие свойства: пористость, тепловыделение, электропроводность и т. д. Все эти изменения более значительны на первоначальном этапе формирования структуры и особенно в

период превращения псевдожидкой структуры бетонной смеси в твердую структуру бетона и постепенно затухают с возрастом бетона.

Очевидно, что при замещении цемента микрокремнеземом будет наблюдаться иной характер структурообразования и набора прочности на ранних сроках твердения, поэтому исследование периода формирования структуры для бетонов и фибробетонов на основе многокомпонентного вяжущего станет важным параметром прогнозирования их свойств.

Особенности формирования структуры и кинетика набора прочности бетонов и фибробетонов были исследованы на 4-х составах равноподвижных смесей с П/Ц=3. Составы бетонных и фибробетонных смесей представлены в таблице 4.5.1.

Таблица 4.5.1

Составы бетонных и фибробетонных смесей

№ п/п	Ц, кг	МК, кг	П, кг	Ф _{ПП} , кг	ГП, % от МКВ	V _{ОБЩ} , дм ³	$\frac{V}{V}$	$\rho_{см}$, кг/м ³
1	500	-	1500	-	-	225	0,45	2323,7
2	460	40	1500	-	-	248	0,496	2280,4
3	460	40	1500	-	0,75	145	0,308	2412,8
4	460	40	1500	0,9	0,75	145	0,308	2411,2

Сроки схватывания и начала набора прочности определялись по скорости прохождения ультразвука в образцах - кубах с ребром 200 мм при помощи прибора УК-14 П. Зависимости изменения скорости прохождения ультразвука в первые сутки твердения и в течение 28 суток отражены на рисунках 4.6.1 и 4.6.2 соответственно.

При использовании многокомпонентного вяжущего в модифицированных бетонах значительно изменяются характер и время формирования структуры в сравнении с контрольным составом. Анализ результатов эксперимента показал, что на начальных сроках твердения (1 - 5 часов) скорость прохождения ультразвука меняется незначительно составов № 1; 3 и 4.

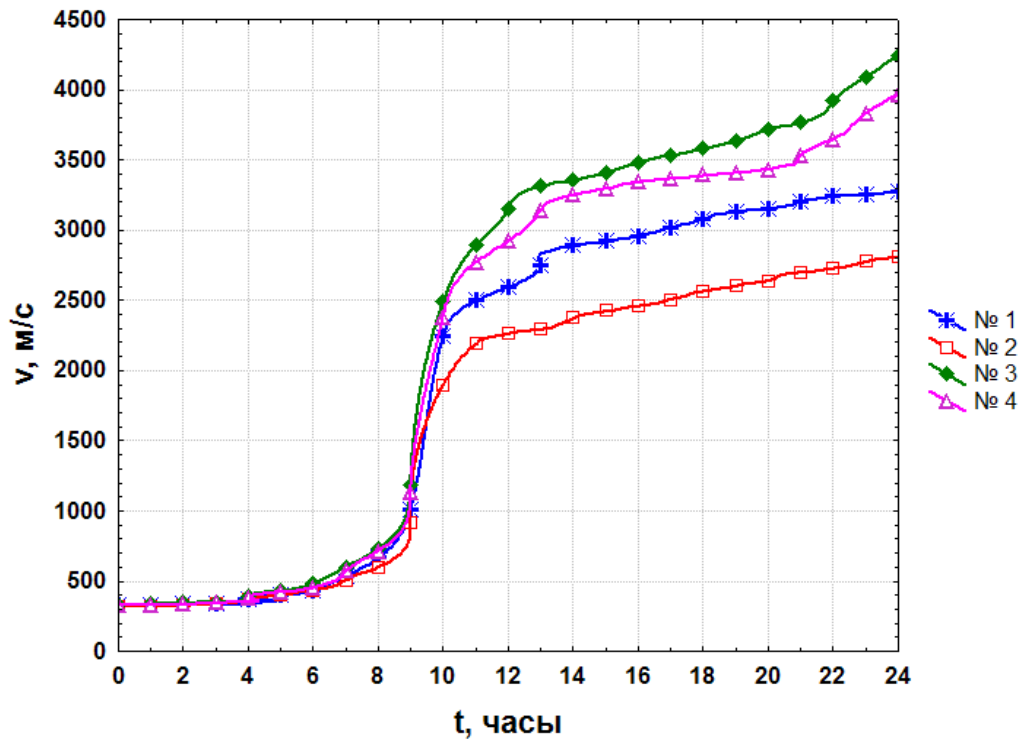


Рис. 4.5.1. - Зависимости скорости прохождения ультразвука в образцах в первые сутки твердения.

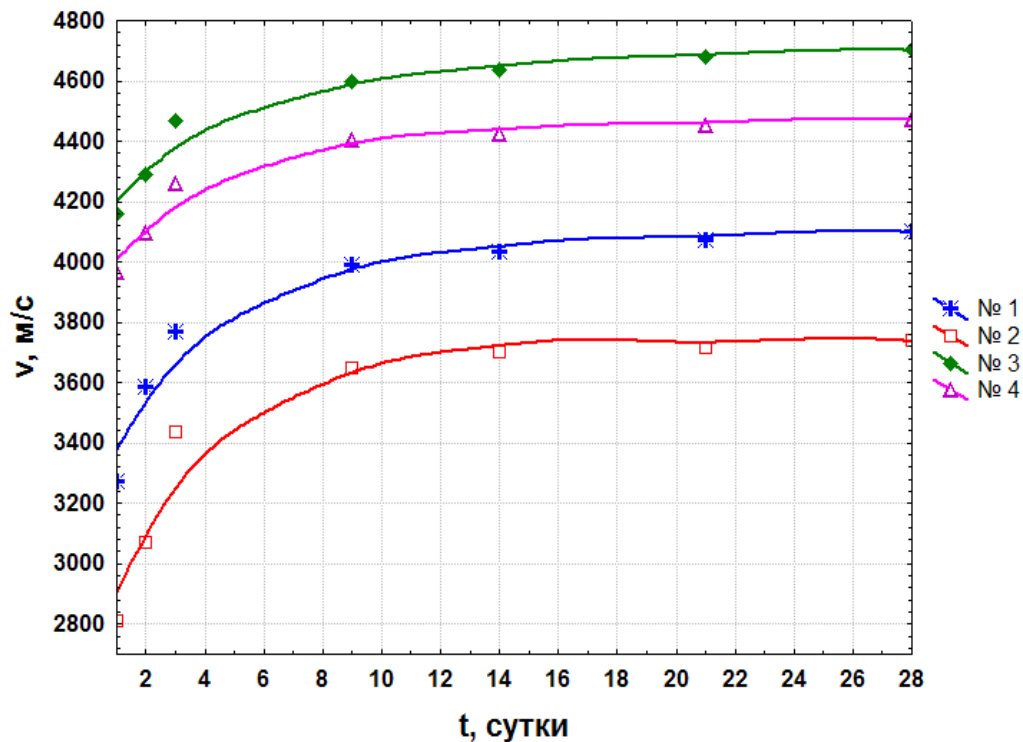


Рис. 4.5.2. - Зависимости скорости прохождения ультразвука в образцах в течение 28 суток твердения.

Снижение скорости у состава № 2 с 8-го по 9-й часы объясняется присутствием микрокремнезема и менее активным структурообразованием. Интенсивное структурообразование наблюдается с 8-го по 10-й часы, после 12-и

часов скорость прохождения ультразвука стабилизируется. При дальнейшем твердении после 14 суток у всех составов скорость ультразвука мало изменяется, что свидетельствует о завершении основного этапа формирования структуры.

В работах [95 - 97] показано, что на время формирования структуры влияют разные скорости растворения частиц микрокремнезема, температуры среды и особенности взаимодействия SiO_2 и CaO между собой. При введении микрокремнезема происходит увеличение сроков схватывания вяжущего, что характеризуется снижением скорости прохождения ультразвука на ранних и поздних сроках твердения образцов. Это объясняется тем, что при замене части цемента происходит снижение доли минералов C_3A и C_3S , с которыми могут соединиться высокоактивные частицы микрокремнезема, вследствие чего процесс образования низкоосновных гидросиликатов типа C-S-H замедляется.

При анализе графиков (рис. 4.5.1 и 4.5.2) определено, что при водовяжущем отношении $V/V=0,308$ скорость распространения волн на 28-е сутки на 20 % выше, чем в образцах с $V/V=0,496$. На данный показатель влияет плотность материала, вызванная снижением расхода воды затворения и уплотнением структуры композита. Повышение скорости прохождения ультразвука зафиксировано также в образцах, сформованных с помощью вибрирования, при общем снижении пористости [98, с. 46].

Также выявлено снижение скорости прохождения ультразвука в образцах с полипропиленовой фиброй. Это происходит вследствие того, что элементарные волокна с их слабой адгезией к цементному камню могут восприниматься как локальные микродефекты. Данный факт подтверждается на всем периоде твердения образцов и исследований формирования структуры и, как видно из дальнейших исследований, никак не связан с фактической прочностью композита. Таким образом, исследования пористости, прочности, поверхностных и глубинных микротрещин по общепринятым стандартам [99] будут являться для фибробетонов недостоверными.

4.6 Особенности кинетики набора прочности мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Кинетика набора прочности была проанализирована по результатам испытаний образцов с ребром 7 см при сжатие в первые сутки твердения и периодических в течение 28 суток. Зависимости изменения прочности бетонов и фибробетонов от времени твердения отражены на рисунках 4.6.1 и 4.6.2.

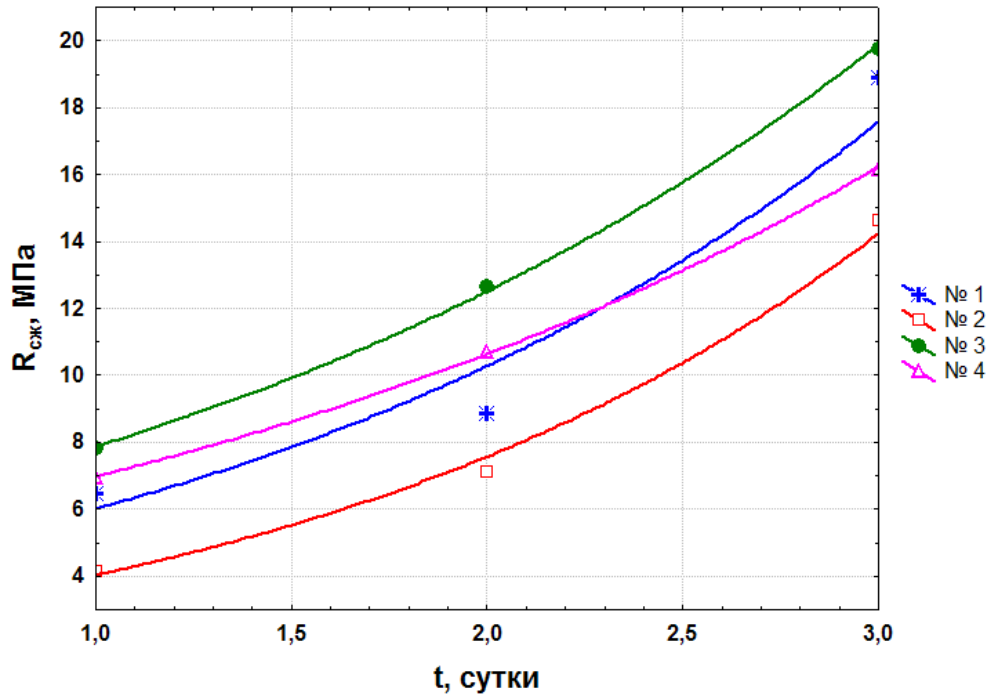


Рис. 4.6.1. - Изменение прочности образцов в первые сутки твердения

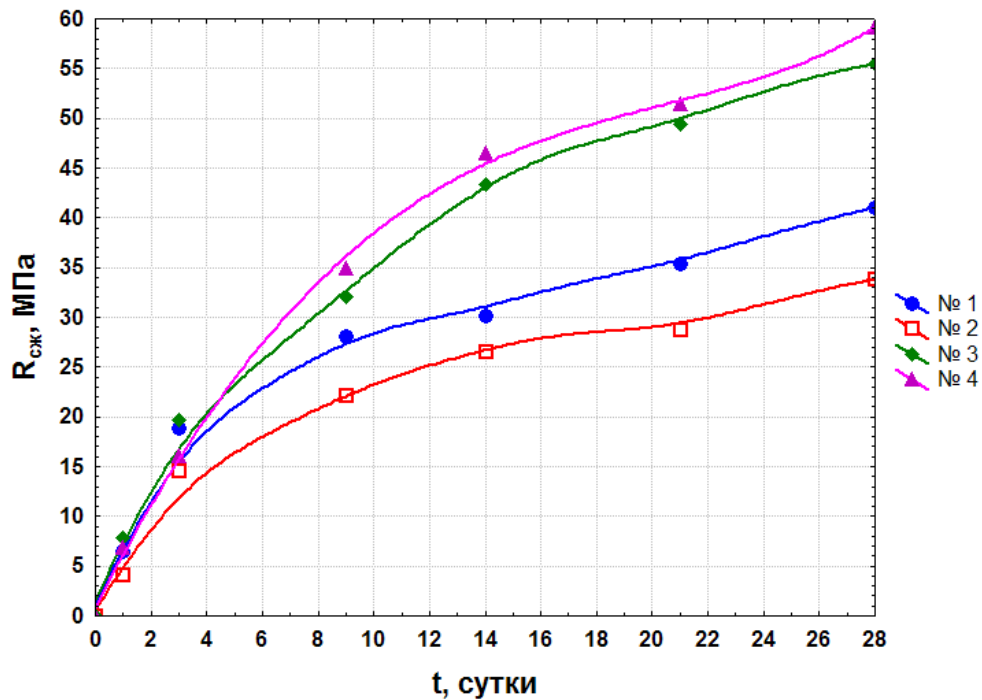


Рис. 4.6.2. - Изменение прочности образцов в течение 28 суток твердения.

Как видно из графиков (рис. 4.6.1), изменение набора прочности образцов № 2; 3 и 4 в первые сутки твердения незначительно отличается от контрольного № 1 и является следствием более поздних сроков схватывания многокомпонентного вяжущего, вызванного торможением гидратации кальцийсодержащих фаз и изменением рН - среды из наличия примесей в микрокремнеземе.

Значительный прирост прочности после 3-х суток твердения наблюдается у модифицированного мелкозернистого бетона (состав № 3) с применением гиперпластификатора и продолжает динамично повышаться на протяжении 28 суток. Кинетика набора прочности у состава № 2 очень близка контрольному № 1. Таким образом, введение микронаполнителя влияет на показатели прочности образцов при сжатии, но почти не оказывает влияние на скорость твердения.

В исследованиях [100] отмечено, что микрокремнезем, использованный в качестве добавки к цементу, имеет значительную пуццолановую активность, в основном в течение 7 – 14 дней после перемешивания с водой. Похожие результаты получены и проанализированы по кинетике набора прочности состава № 4. Значительный рост прочностных показателей отмечен с 3-х по 14-е сутки твердения, а на 28-е сутки прочность при сжатии образцов на 8 % больше, чем прочность образцов № 3. Это объясняется проявлением пуццолановой активности микрокремнезема, ростом новообразований и более глубокой гидратацией вяжущего за счет миграции молекул воды через адсорбционные оболочки, образованные молекулами гиперпластификатора. Кроме того, микрокремнезем в составе вяжущего не только способствует уплотнению структуры бетона, но и усиливает контактную зону цементной матрицы с полипропиленовой фиброй, повышая ее анкеруемость и использование прочностных и эксплуатационных резервов.

Рост прочностных показателей после 28 суток твердения объясняется проявлением пуццолановой активности микрокремнезема, ростом новообразований и более глубокой гидратацией вяжущего за счет миграции молекул воды через адсорбционные оболочки, образованные молекулами гиперпластификатора.

4.7 Усадочные деформации мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Процессы формирования структуры сопровождаются объемными изменениями в зависимости от условий твердения. Расширение и усадка бетона более значительны на первоначальном этапе формирования структуры и постепенно затихают с возрастом бетона. Развитие усадочных деформаций и внутренних напряжений приводит к образованию микро- и макротрещин в бетоне, что в значительной степени влияет на трещиностойкость, жесткость и долговечность бетона [101 - 103].

Формирование структуры и изменение свойств бетона во времени определяются главным образом гидратацией цемента. Реакция совместной гидратации цемента и микрокремнезема протекает без изменения объема твердой фазы. С одной стороны, она не способствует стимулированию распора и развитию внутренних напряжений, а с другой – улучшает качество гидратной связки по прочности путем превращения ее малопрочной составляющей в высокопрочную [105]. Кинетика набора прочности и период формирования структуры для бетона и фибробетона на основе многокомпонентного вяжущего различны, и, следовательно, отличается их усадка.

Для высокопрочных бетонов снижение усадочных деформаций обеспечивается в основном водоредуцированием за счет использования различных видов суперпластификаторов и синтетических волокон в качестве армирующего материала [62, с. 201; 89, с. 704; 106, с. 243]. Гиперпластификатор на поликарбоксилатной основе и полипропиленовая фибра в составе модифицированного мелкозернистого фибробетона позволяют регулировать процессы усадки и не допускать развития внутренних напряжений.

В исследованиях [107, с. 232; 108, с. 181] отмечено, что вид цемента и прочность бетона мало влияют на значения усадки. На деформации усадки в значительной степени влияют качество наполнителей, степень вызревания бетона к началу высыхания и размеры конструкции. Поэтому важным параметром исследования усадки является выбор размеров образца, поскольку с увеличением

модуля поверхности повышаются усадочные деформации, обусловленные интенсивным испарением свободной воды из капилляров и микропор бетона.

Европейский стандарт [109] регламентирует исследование усадки бетонов для балочек с размерами 160*40*40 мм, содержащих поры и наполнители не более 4 мм. В исследованиях [110] определено, что характер изменения усадочных деформаций бетонных образцов с размерами 100*100*100 мм и 40*40*160 мм практически одинаков, несмотря на разные абсолютные величины усадочных деформаций данных кубов и призм.

В связи с этим, исследование деформаций усадки на малых призмах будет достаточным для оценки общей величины усадки бетона, состоящей из влажностной и карбонизационной составляющей.

Измерение и анализ деформаций усадки производились на образцах с размерами 40*40*160 мм составов 1 – 4 (таблица 4.5.1) при следующих условиях:

- после выдержки 12 часов с момента формовки, распалубливания и набора прочности в течение суток непосредственно на приборе (рис. 4.7.1);
- в течение 28 суток твердения образцов в условиях квазистатической сушки по методике Шейкина А.Е. при комнатной температуре (рис. 4.7.2).

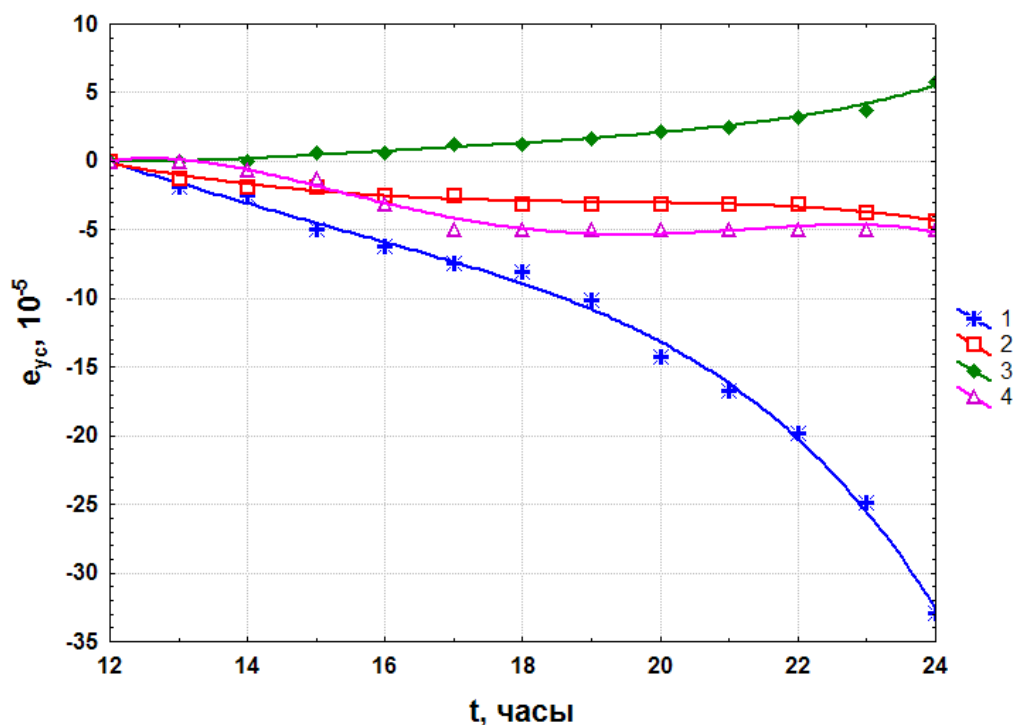


Рис. 4.7.1. - Изменение деформаций усадки в первые сутки твердения.

В дальнейшем образцы выдерживались в течение 28 дней при относительной влажности воздуха менее 60 % в условиях квазистатической сушки, при которой перепады влагосодержания внутри и на поверхности образцов остаются очень маленькими. Исследование процессов усадки в данном случае максимально приближено к условиям твердения бетона на строительной площадке без применения способов ухода за бетоном. Графики изменения деформаций усадки образцов за 28 суток твердения представлены на рисунке 4.7.2.

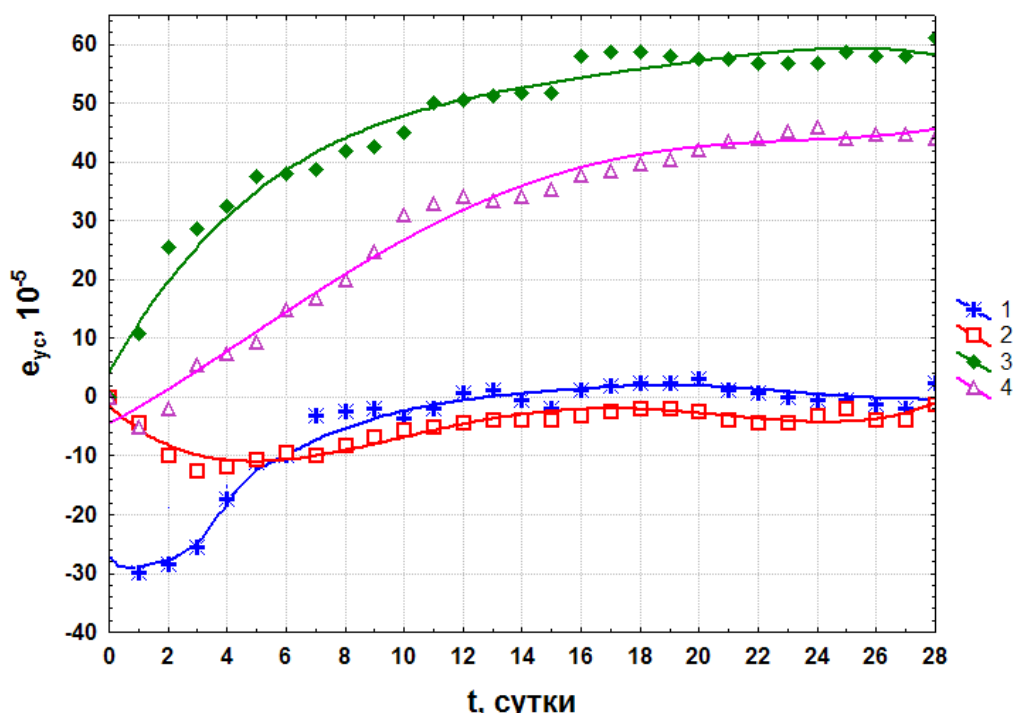


Рис. 4.7.2. - Изменения деформаций усадки в течение 28-х суток твердения.

В условиях квазистатической сушки сначала удаляется капиллярная влага, потом адсорбционно-связанная влага из полимолекулярных слоев кристаллов гидросиликатов кальция и затем межплоткостная, находящаяся между слоями кристаллической структуры новообразований. Следует отметить, что именно количество адсорбционно-связанной воды в цементном тесте определяет степень гидратации цемента. Уменьшение относительной влажности воздуха при постоянном давлении приводит к повышению капиллярного давления и, следовательно, к увеличению усадки. Интенсивное удаление химически-связанной воды ведет к обезвоживанию кристаллогидратов и разрушению их структуры, что неизбежно приводит к снижению прочности бетона [16, с. 232].

Согласно графикам (рис. 4.7.2), до 10-х суток твердения во всех составах наблюдаются изменение усадки и появление необратимой части деформации, составляющей от 0,3 до 0,6 от величины общей усадки. Это может объясняться тем, что необратимость усадки связана с образованием дополнительных структурных связей в цементном геле за счет установления более плотного контакта между его частицами при высушивании [111, с.213], и действием внутренних растягивающих напряжений при формировании новообразований.

После 16-и суток твердения усадочные деформации образцов стабилизируются и не превышают 10 %, что объясняется появлением новообразований с различными кристаллическими структурами и энергиями связи молекул адсорбированной воды на их поверхности.

Полученные значения усадочных деформаций, в особенности для образцов № 3 и № 4 с низким В/Ц-отношением, вписываются в модель типовой кривой усадки цементного камня (рис. 4.7.3).

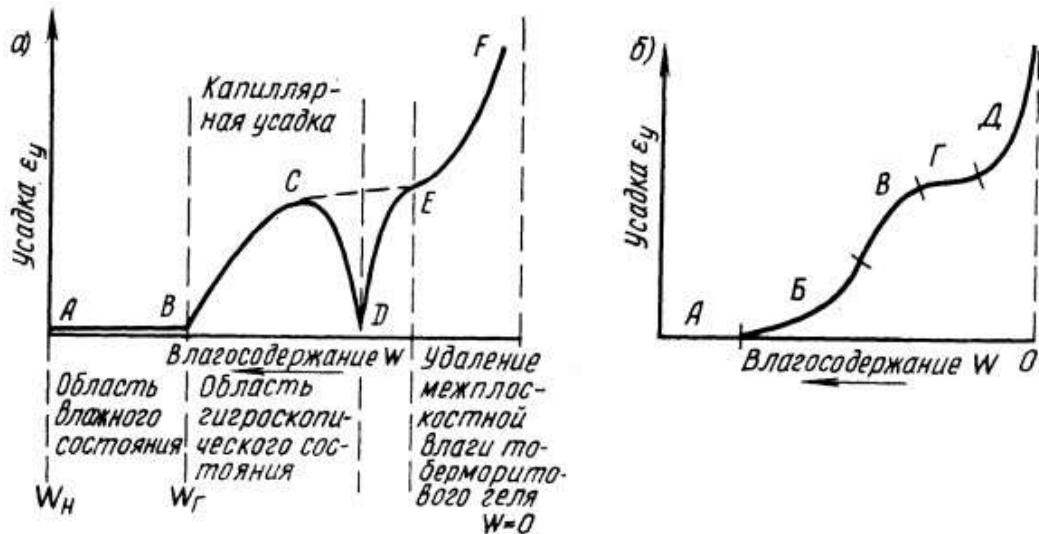


Рис. 4.7.3. - Кривые усадки цементного камня

а – типовая кривая усадки цементного камня [16, с. 232]; б – экспериментальная кривая усадки цементного камня [112, с. 101].

Кривые усадки цементного камня показывают взаимосвязь между усадкой цементного камня и количеством удаленной из него воды при твердении в условиях квазистатической сушки. Анализируя изменения деформаций усадки контрольных образцов (рис. 4.7.2.) можно утверждать, что композиты с низким В/Ц имеют большую усадку в начале набора прочности, вызванную нехваткой

химически связанной воды. Помимо снижения степени гидратации вяжущего в дальнейшем потеря кристаллизационной воды в процессе обезвоживания кристаллогидратов может сопровождаться разрушением их структуры с появлением кристаллогидратов с малой прочностью, что приводит, в конечном счете к значительному снижению прочностных характеристик.

Деформации усадки образцов, ненасыщенных водой, в значительной степени изменялись при перепадах температур от $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Необходимость данных исследований позволяет прежде всего оценить возможности применения модифицированных бетонов и фибробетонов в условиях работы конструкций при повышенных температурах. Графики изменения деформаций усадки при разных температурах показаны на рисунке 4.7.4.

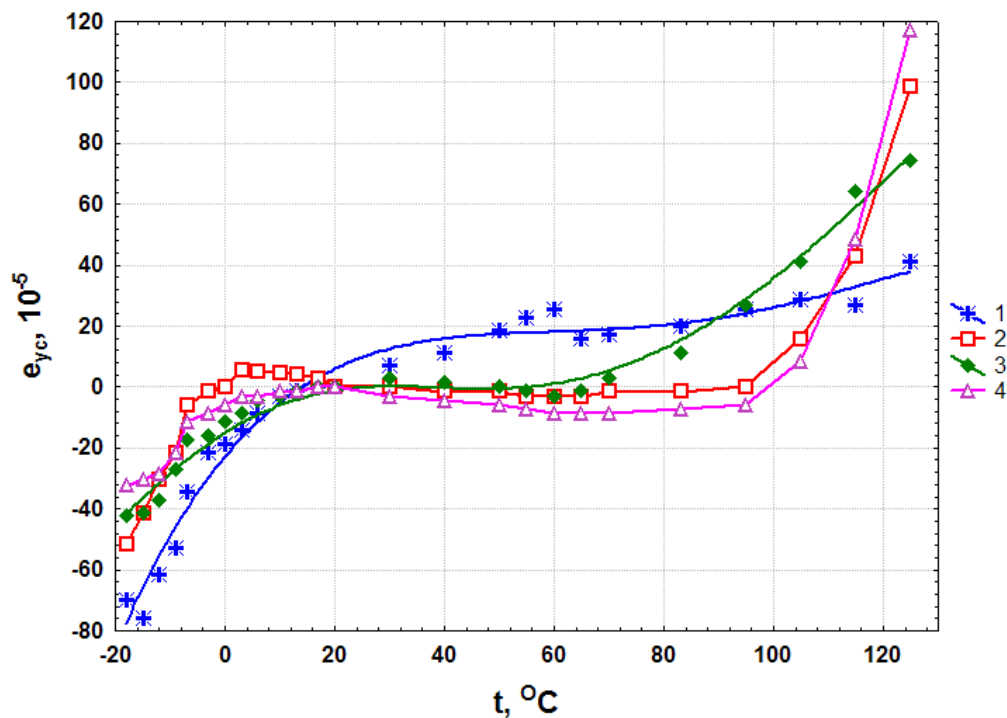


Рис. 4.7.4. - Изменения деформаций усадки при разных температурах.

По результатам анализа графиков (рис. 4.7.4) можно сделать вывод, что модифицированные бетоны (составы № 2, 3 и 4) имеют меньшие усадочные деформации в диапазоне от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$, по сравнению с контрольным составом. При $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ величина относительных деформаций усадки у состава №1 в 2 раза выше, чем у состава № 2. Наиболее стабильные показатели имеют составы № 2 и № 4. В диапазоне температур от $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$ усадочные деформации близки к нулю, что объясняется препятствием деформаций сжатия-

растяжения за счет взаимодействия микрокремнезема и волокон.

Усадочные деформации, возникающие при каждом изменении температуры со временем, определяются по формуле [113, с. 12]:

$$\varepsilon_{VC}(t) = \alpha_{bt} \cdot \Delta T(t), \quad (4.7.1)$$

где α_{bt} – коэффициент линейной температурной деформации бетона, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; $\Delta T(t)$ – приращение температуры бетона в момент времени, $^{\circ}\text{C}$.

Анализ графиков (рис. 4.7.4) показал, что ввиду разных составов образцов коэффициент линейной температурной деформации композита в пределах от $+125^{\circ}\text{C}$ до $+20^{\circ}\text{C}$ и от $+20^{\circ}\text{C}$ до -18°C будет разным и изменяться в следующих диапазонах:

- состав № 1: $\alpha_{bt-} = 1,84 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $\alpha_{bt+} = 3,95 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- состав № 2: $\alpha_{bt-} = 1,34 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $\alpha_{bt+} = 9,39 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- состав № 3: $\alpha_{bt-} = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $\alpha_{bt+} = 7,08 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$;
- состав № 4: $\alpha_{bt-} = 8,42 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ и $\alpha_{bt+} = 1,11 \cdot 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Полученные данные показывают, что у состав № 4 при отрицательных температурах усадка более чем в 2 раза меньше, чем у контрольного состава. Однако при высоких температурах наблюдается противоположный эффект. Отсюда можно предположить, что появление больших деформаций усадки у модифицированного мелкозернистого фибробетона вызвано особенностями температурного расширения полипропилена и увеличением его объема. Температурные коэффициенты линейного расширения материалов, слагающих структуру композита, и самого бетона в целом различны и имеют следующие значения (при $t = 20^{\circ}\text{C}$):

- цемент – $\alpha = 1,25 \div 3 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, [114, с. 98];
- кварц (оксид кремния) – $\alpha = 0,5 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, [115];
- полипропилен – $\alpha = 1,1 \div 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, [119; 126];
- бетон – $\alpha = 10 \cdot 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, [116].

На рисунке 4.7.5 сопоставлены значения абсолютных удлинений материалов, входящих в состав смеси.

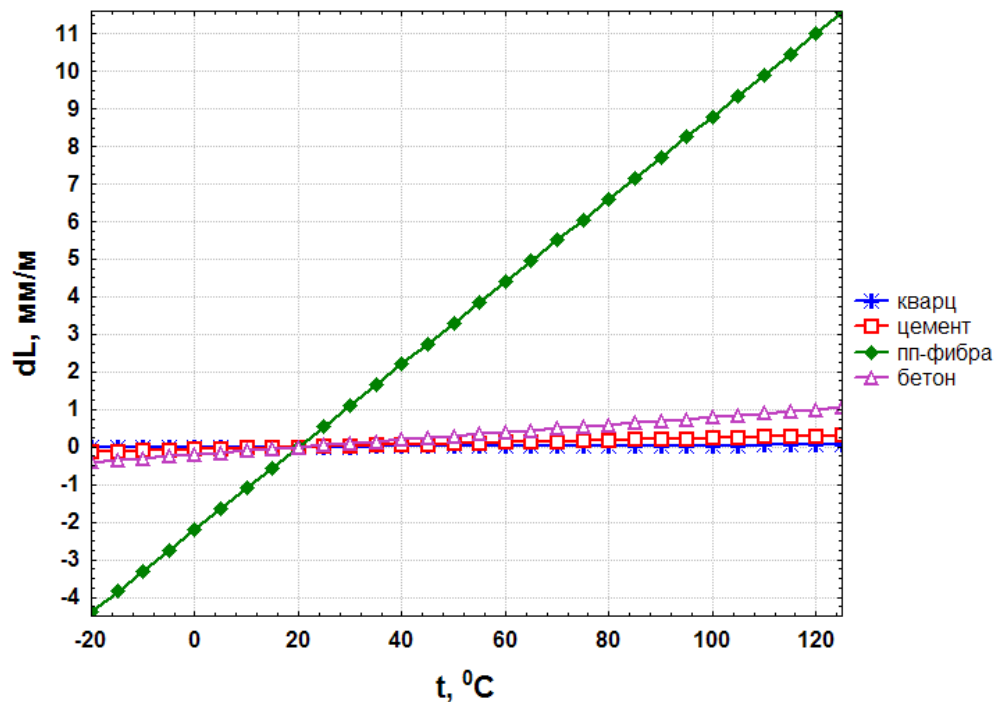


Рис. 4.7.5. - Абсолютное удлинение материалов при разных температурах.

Анализ графиков термических изменений абсолютной длины материалов показывает, что полипропилен расширяется и сужается во много раз сильнее остальных компонентов, особенно при повышении температуры. С увеличением объема элементарных волокон в цементном камне возникают внутренние расширяющие напряжения, которые приводят к значительным повышениям линейных деформаций бетона.

Таким образом, исследования деформационных свойств бетонов позволили выявить следующие особенности изменения деформаций усадки образцов:

- отмечена стабилизация усадки после 16-х суток твердения у всех составов;
- для бетонов и фибробетонов с низким В/Ц характерно появление необратимой части деформации, вызванной расширением при твердении;
- деформации расширения модифицированных композитов при высоких температурах выше, чем у контрольного состава мелкозернистого бетона; при низких температурах наблюдается обратный эффект;
- на величину усадки и усадочных деформаций влияет как состав бетона, так и теплофизические свойства его компонентов.

Выводы по 4-й главе:

1. Исследованы технологические свойства мелкозернистых бетонов на основе многокомпонентного вяжущего с учетом параметра оптимизации П/Ц и получены уравнения для их прогнозирования.

2. Исследовано влияние гиперпластификатора на технологические свойства и структурные характеристики мелкозернистых бетонов. Установлено, что применение добавки позволяет снизить В/Ц затворения до 50 %; оптимальный расход добавки составляет от 0,25 до 0,75 % от массы вяжущего. Разработаны поправочные коэффициенты влияния добавки, позволяющие проектировать смеси требуемой удобоукладываемости.

3. Проанализированы способы введения полипропиленовой фибры в смесь в зависимости от ее удобоукладываемости, условий и особенностей производства. Предложены и обоснованы способы и последовательность перемешивания компонентов для обеспечения наилучшей диспергации волокон в бетоне.

4. Изучены процессы структурообразования и кинетики набора прочности модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй. Доказано, что взаимодействие микрокремнезема, поликарбоксилатной добавки и полипропиленовой фибры позволяет улучшить кинетику набора прочности бетона и значительно повысить его прочностные характеристики.

5. Изучены усадочные деформации ММФБ в условиях квазистатической сушки и при термических воздействиях. На основании исследований температурного расширения материалов доказано, что на усадку влияют условия твердения, водовяжущие отношения составов и теплофизические свойства компонентов смеси. Определено, что модифицированные составы имеют минимальные значения «расширения - усадки» в диапазоне температур от -20 °С до +90 °С, что подтверждается результатами исследований коэффициентов линейной температурной деформации.

Глава 5. Прочностные свойства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

5.1 Прочностные свойства мелкозернистых бетонов на основе многокомпонентного вяжущего

В главе 4 отмечено, что увеличение доли песка ведет к повышению водопотребности равноподвижных смесей, что неизбежно приводит к снижению прочности бетона. Для анализа влияния параметров П/Ц и В/Ц на прочность мелкозернистого бетона приготовлены равноподвижные смеси и испытаны в возрасте 28 суток. На рисунке 5.1.1 показана изоповерхность изменения прочности бетона при сжатии в зависимости от соотношения между песком и цементом и водоцементным отношением смеси.

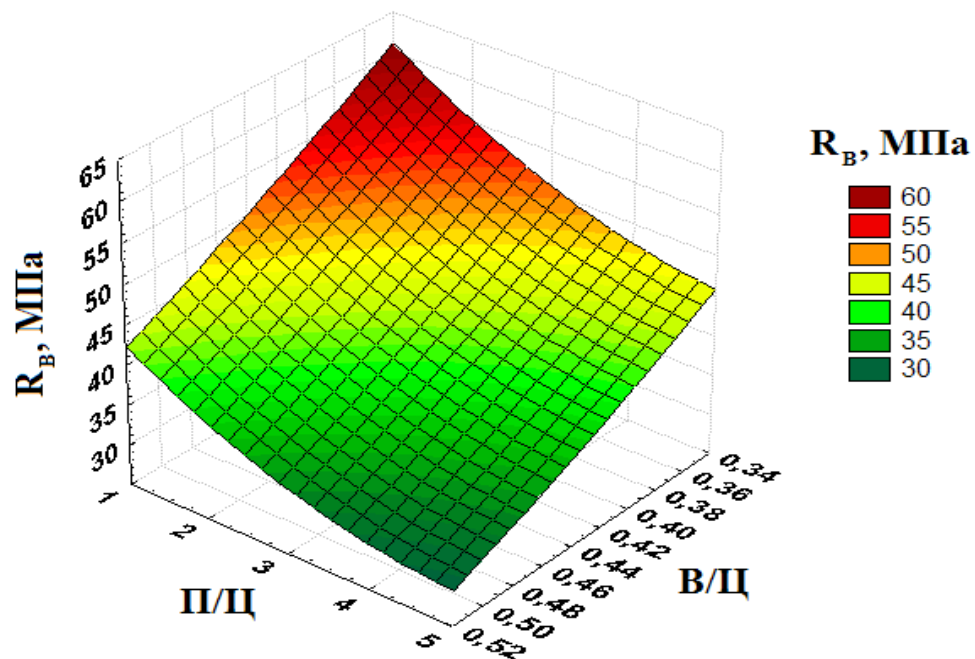


Рис. 5.1.1 - Изоповерхность изменения прочности мелкозернистого бетона.

Значение прочности мелкозернистого бетона определяется по формуле:

$$R_b = 120,99 - 184,63 \cdot B / Ц - 9,15 \cdot П / Ц + 89,31 \cdot B / Ц^2 + 0,69 \cdot П / Ц^2 + 3,33 \cdot B / Ц \cdot П / Ц \quad (5.1.1)$$

Полученные результаты (рис. 5.1.1) подтверждают, что значительное снижение прочности бетона тесно связано с изменением доли песка в смеси, объемной концентрацией цементного теста и расходом воды затворения. С уменьшением содержания цемента в тощих смесях ($П/Ц > 3$) цементного теста может не хватать для обмазки зерен песка и заполнения всех пустот, что

приводит к увеличению пористости и снижению прочности бетона. В связи с этим отсутствует возможность получения качественных бетонов с расходом цемента в 200 – 300 кг/м³. Следует отметить, что определение прочностных характеристик бетонов и фибробетонов с П/Ц от 0 до 2,5 целесообразно лишь с теоретической точки зрения. Использование в практике бетонов с объемной концентрацией цементного теста $C > 0,6$ (расход цемента на 1 м³ бетона более 700 кг/м³) экономически неэффективно [117, с. 8].

Повышение качества бетона как композита может быть осуществлено за счет максимального использования энергетических возможностей цемента. Это происходит в силу возникающих в твердеющей системе бетона внутренних напряжений, ограничивающих его расход [38, с. 22]. Эффективным решением данной проблемы служит введение микронаполнителей, которые обладают высокими удельной поверхностью и поверхностной энергией, что благоприятно сказывается на формировании и уплотнении структуры бетона.

При замене доли цемента микрокремнеземом получены вяжущие с высокой активностью без предварительной активации. На рисунке 5.1.2 показан график изменения активности многокомпонентного вяжущего ($R_{МКВ}$) в зависимости от расхода тонкодисперсной добавки (МК).

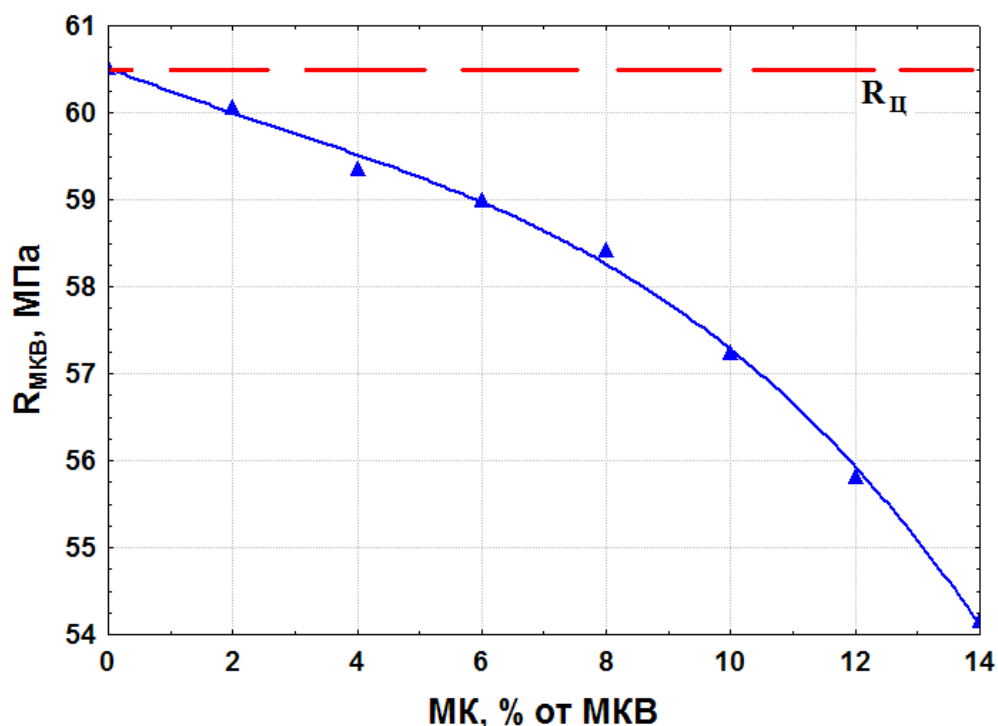


Рис. 5.1.2 - График изменения активности многокомпонентного вяжущего.

Активность (прочность) многокомпонентного вяжущего $R_{МКВ}$ зависит от активности цемента и дозировок микрокремнезема и определяется уравнением:

$$R_{МКВ} = R_{Ц} - 0,002 \cdot МК^3 + 0,019 \cdot МК^2 - 0,294 \cdot МК \quad (5.1.2)$$

Как видно из графика (рис. 5.1.2), количество активной добавки, замещающей долю цемента, влияет на активность вяжущего. Однако прочность МКВ остается достаточно высокой, а ее снижение происходит равномерно, что свидетельствует о возможности замены портландцемента микрокремнеземом до 14 % по массе. При этом критерий «расход добавки – активность вяжущего – экономия цемента» будет оптимальным при расходе МК= 8 ÷ 10 % от общей массы вяжущего. При этом фактическая активность вяжущего составила $R_{МКВ} = 58,4 \div 57,2$ МПа, что всего на 4 - 5 % меньше активности цемента.

Анализ активности цемента и прочности мелкозернистых бетонов при разных соотношениях между песком и цементом показал, что в пределах $2 \leq П/Ц \leq 4$ расчет требуемого водоцементного (водовязущего) отношения следует производить по формуле:

$$\left(\frac{В}{Ц} \right)_{ТР} = \frac{0,386 \cdot R_{Ц}}{R_{Т} + 0,165 \cdot R_{Ц}}, \quad (5.1.3)$$

где $R_{Т}$ – требуемая прочность бетона на сжатие, МПа (по ГОСТ 18105-2010); $R_{Ц}$ – активность (прочность) цемента или многокомпонентного вяжущего, МПа.

При $П/Ц < 2$ и $П/Ц > 4$ значения требуемого В/Ц-отношения, определяемого по данной формуле, противоречивы, поэтому для проектирования жирных или тощих мелкозернистых бетонов следует провести предварительные испытания для уточнения поправочных коэффициентов.

5.2 Прочность и трещиностойкость мелкозернистых бетонов с термообработанной полипропиленовой фиброй

При использовании полипропиленовой фибры в качестве дисперсного армирования бетона следует учитывать ее эксплуатационные свойства и условия работы конструкций из фибробетона.

Уплотнение структуры композита за счет формирования новообразований и кристаллических сростков на границе раздела фаз вследствие более глубокой

гидратации вяжущего позволяет улучшить механическое сцепление и анкеровку полипропиленовой фибры. Однако, вследствие неполярных свойств полипропилена и отсутствия межмолекулярных связей, все синтетические волокна имеют слабую смачиваемость и плохую адгезию к цементному камню.

Обеспечение совместной работы волокон и бетона может быть достигнуто только за счет их механического зацепления [61, гл. 4]. Согласно исследованию [118], при включении полипропиленовых волокон прочность при изгибе, сжатии и на раскалывание обычно снижалась, но увеличивалась пластичность. Похожие результаты были получены при испытаниях мелкозернистых фибробетонов с П/Ц=3, однако при расходе полипропиленовой фибры $\Phi_{\text{ПП}}=3$ кг/м³ прочность на растяжение при изгибе увеличилась на 9 % [120, с. 47].

Повышение прочности на растяжение при изгибе можно объяснить включением в работу бетона элементарных микроволокон, предел прочности на растяжение которых составляет 240 МПа, что соизмеримо с характеристиками стальной арматуры класса А240. Ухудшение данных показателей происходит при расходе полипропиленовой фибры $\Phi_{\text{ПП}}>3$ кг/м³, что связано с переармированием матрицы и повышением абсолютного объема волокон в смеси ввиду низкой плотности исходного материала – полипропилена ($\rho_{\text{ПП}} = 0,91$ г/см³).

Снижение прочности при сжатии фибробетона также обусловлено низким модулем упругости полипропилена (для немодифицированного $E = 3500 \div 3900$ МПа), что в 4-6 раз меньше модуля упругости бетона. Образование масляной пленки и загрязнение поверхности композитных волокон при их производстве и транспортировке так же могут стать причиной снижения адгезии с цементным камнем [104].

Плохая адгезия фибры с матрицей бетона может быть обусловлена неполярным характером полипропилена, свойства которого в основном определяются химическим составом и молекулярной структурой. Однако стойкость к истиранию и механической перфорации повышаются с увеличением молекулярного веса и почти не зависят от стереоизометрического состава полипропилена.

Данные о патентах [121; 122] показывают, что совершенствование физико – химических и эксплуатационных свойств полипропилена сводится к модифицированию исходного материала путем введения пластификаторов и стабилизаторов (модификаторов структуры).

Можно предположить, что улучшение сцепления и усиление контактной зоны цементного камня и волокон возможно благодаря повышению их шероховатости. Предпосылкой данных исследований становится выдвинутая гипотеза о возможности повышения эффективности полипропиленовой фибры путем термического и химического модифицирования ее поверхности, а так же другими методами деструкции поверхности полипропилена без образования макродефектов. Поскольку температура тепловой деформации полипропилена составляет $+97\text{ }^{\circ}\text{C}$, то в эксперименте полипропиленовая фибра подвергалась кипячению в течение 10 секунд, которое привело к значительным геометрическим изменениям волокон (рис. 5.2.1).



Рис. 5.2.1 - Полипропиленовая фибра до и после кипячения

На рисунках 5.2.2 и 5.2.3 представлены графики изменения прочности при сжатии и на растяжение при изгибе мелкозернистых бетонов с обычной и термообработанной полипропиленовой фиброй.

По результатам анализа графиков получены зависимости для прогнозирования прочности при сжатии мелкозернистого бетона с обычной и термообработанной полипропиленовой фиброй соответственно:

$$R_{fb} = R_b + 0,33 \cdot \Phi_{III}^3 - 1,33 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,49 \cdot \Phi_{III} \quad (5.2.1)$$

$$R_{fb} = R_b - 0,27 \cdot \Phi_{III}^3 - 1,84 \cdot \Phi_{III}^2 + 3,67 \cdot \Phi_{III} \quad (5.2.2)$$

где R_b – прочность мелкозернистого бетона без фибры, МПа; Φ_{III} – расход полипропиленовой фибры, $\text{кг}/\text{м}^3$.

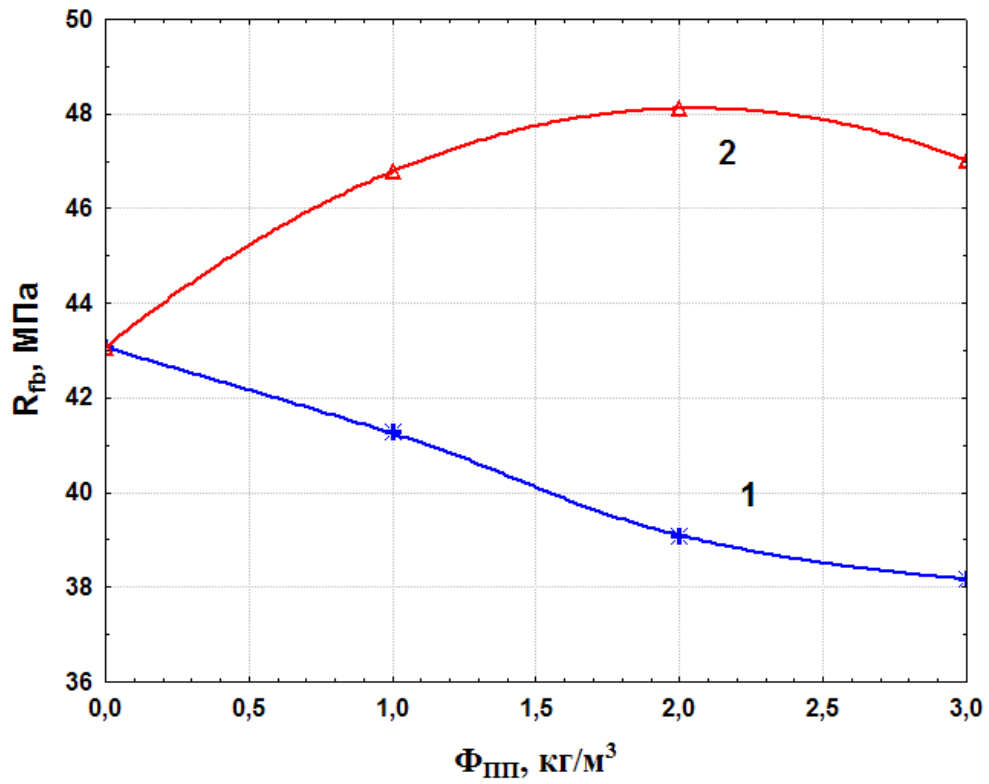


Рис. 5.2.2 - Зависимости изменения прочности при сжатии мелкозернистого бетона: 1 – с обычной ПП - фиброй; 2 – с термообработанной ПП — фиброй.

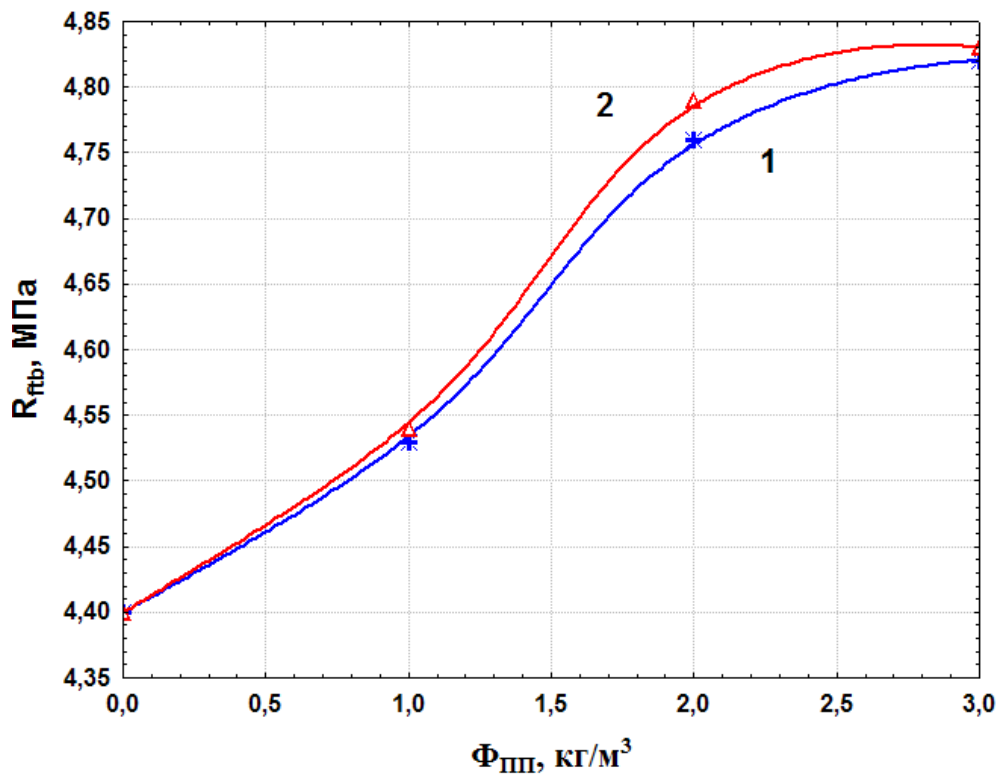


Рис. 5.2.3 - Зависимости изменения прочности при изгибе мелкозернистого бетона: 1 – с обычной ПП - фиброй; 2 – с термообработанной ПП - фиброй.

Анализ графиков (рис. 5.2.2; 5.2.3) показывает, что с увеличением расхода обычной полипропиленовой фибры прочность фибробетона при сжатии снижается, а при введении термообработанной фибры повышается до 12 %.

Прочность на растяжение при изгибе бетона с обычной и термообработанной полипропиленовой фиброй изменяется незначительно по отношению друг к другу, но возрастает с увеличением ее расхода:

$$R_{fb} = R_{tb} + 0,148 \cdot \Phi_{III} \quad (5.2.3)$$

где R_{tb} – прочность бетона на растяжение при изгибе без волокон, МПа.

Проведенные испытания доказывают, что в обычных составах мелкозернистого бетона увеличение расхода полипропиленовой фибры приводит к снижению прочности при сжатии. Повышение прочности при сжатии фибробетона с термообработанными волокнами объясняется тем, что при кипячении удаляется замасливатель, влияющий на качество контактной зоны, и происходит деформирование волокон, улучшающее их анкеруемость в цементном камне.

Обработка полипропиленовой фибры возможна сильными окислителями - хлорсульфоновой кислотой, концентрированными азотной и серной кислотами и галогенами. Незначительно действуют концентрированная 58 %-ная серная кислота и 30 %-ный пероксид водорода при комнатной температуре. Однако продолжительный контакт с этими реагентами при 60 °С и выше приводит к деструкции полипропилена [58]. Именно возникшие термические деформации, нарушения структуры и окисление полипропилена позволяют увеличить шероховатость поверхности и анкеруемость фибры, снизить пористость и упрочнить контактную зону с цементным камнем.

По мнению исследователей [123, с. 89; 16, с. 129] разрушение бетона при осевом сжатии наступает при таких значениях напряжений в цементном камне, при которых исчерпывается его предельная растяжимость в направлении, нормальном к действию внешней силы; непосредственными же причинами разрушения образцов могут быть только растягивающие деформации, возникающие за счет неоднородности напряженно-деформированного состояния.

Полипропиленовая фибра, равномерно распределенная по всему объему, создает «эффект обоймы», чем противодействует растягивающим деформациям и повышает пластичность, предупреждая разрушение образца.

Влияние полипропиленовой фибры на способность бетона сопротивляться началу движения и развитию трещин при механических воздействиях может быть определено по характеристикам трещиностойкости, которая тесно связана с показателями прочности бетона.

Трещиностойкость (вязкость разрушения) фибробетона оценивалась по условному критическому коэффициенту интенсивности напряжения K_{c^*} , условно характеризующей критическое состояние материала при динамическом начале движения магистральной трещины. Для сравнения показателей были проведены неравновесные испытания образцов (составы равноподвижных смесей с П/Ц = 3, В/Ц = 0,43 и расходом полипропиленовой фибры $\Phi_{\text{ПП}} = 0 \div 3 \text{ кг/м}^3$) с искусственным надрезом по типу 1 в соответствии с ГОСТ 29167 – 91. На рисунке 5.2.4 представлены зависимости нагрузки F_c , действующей на образец в процессе испытания, и перемещений f .

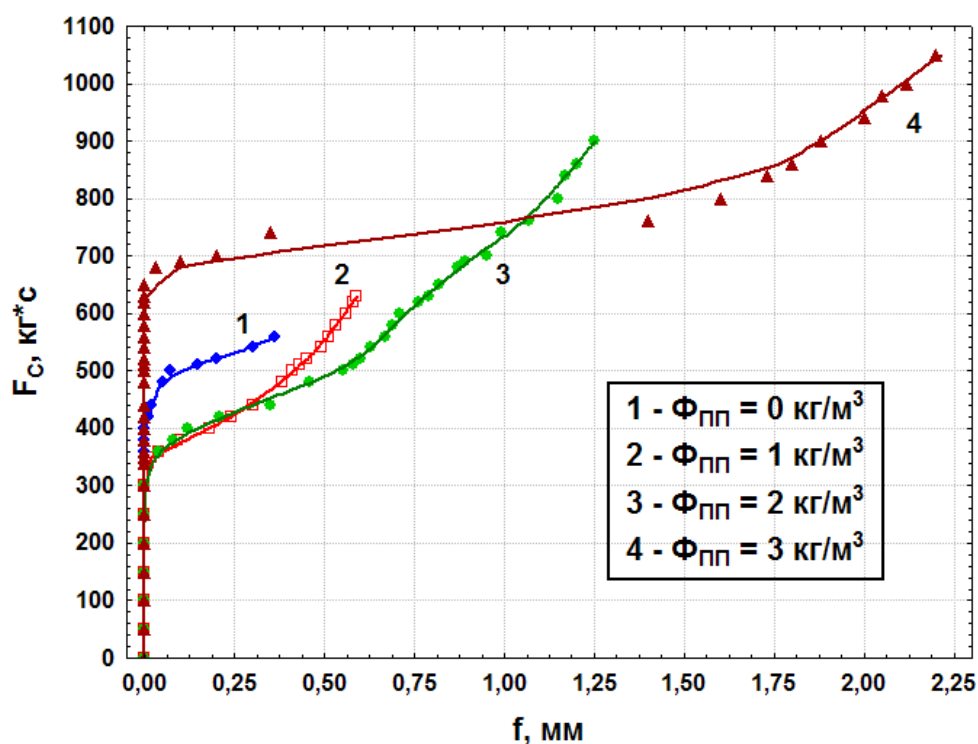


Рис. 5.2.4 - Зависимости нагрузки и перемещений при неравновесных испытаниях образцов.

Данные зависимости показывают, что при использовании полипропиленовой фибры образцы выдерживают более высокие разрушающие нагрузки. При этом фактический прогиб до разрушения образцов-балочек из мелкозернистого фибробетона оказался выше контрольного в 1,85 раза.

Истинные значения условного критического коэффициента интенсивности напряжения K_C^* были определены по формуле [106, с. 298]:

$$K_C^* = \frac{3 \cdot F_C^* \cdot L_0}{\left(\frac{2 \cdot b^{0,5} \cdot t \cdot \sqrt{a_0}}{b \cdot (1,93 - 3,07 \cdot \lambda + 14,53 \cdot \lambda^2 - 25,11 \cdot \lambda^3 + 25,8 \cdot \lambda^4)} \right)}, \quad (5.2.4)$$

Зависимости условного критического коэффициента интенсивности напряжения K_C^* при напряженно-деформированном состоянии композита от разрушающей нагрузки, действующей на образец, и расхода обычной и термообработанной полипропиленовой фибры показаны на рисунках 5.2.5 и 5.2.6 и определяются по формулам соответственно:

$$K_C^* = 8,74 + 4,24 \cdot F_C^2 - 11,44 \cdot F_C - \text{для графика 1 (рис. 5.2.5)} \quad (5.2.5)$$

$$K_C^* = 8,82 + 4,19 \cdot F_C^2 - 11,43 \cdot F_C - \text{для графика 2 (рис. 5.2.5)} \quad (5.2.6)$$

$$K_C^* = 1,03 - 0,112 \cdot \Phi_{III}^3 + 0,553 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,333 \cdot \Phi_{III} - \text{для графика 1 (рис. 5.2.6)} \quad (5.2.7)$$

$$K_C^* = 1,03 - 0,109 \cdot \Phi_{III}^3 + 0,535 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,298 \cdot \Phi_{III} - \text{для графика 2 (рис. 5.2.6)} \quad (5.2.8)$$

Таким образом доказано, что условный критический коэффициент интенсивности напряжения в мелкозернистом бетоне с полипропиленовой фиброй выше в 1,9 раза в сравнении с контрольным составом, а сопротивление разрушающей нагрузке при этом возрастает до 90 %.

Полученные зависимости для определения показателей трещиностойкости также доказывают, что применение прокипяченных полипропиленовых волокон за счет улучшения адгезии к цементному камню и более лучшей сформированной контактной зоны в определенной степени повышает прочностные и деформационные показатели качества фибробетонов, что положительно может сказаться на их долговечности.

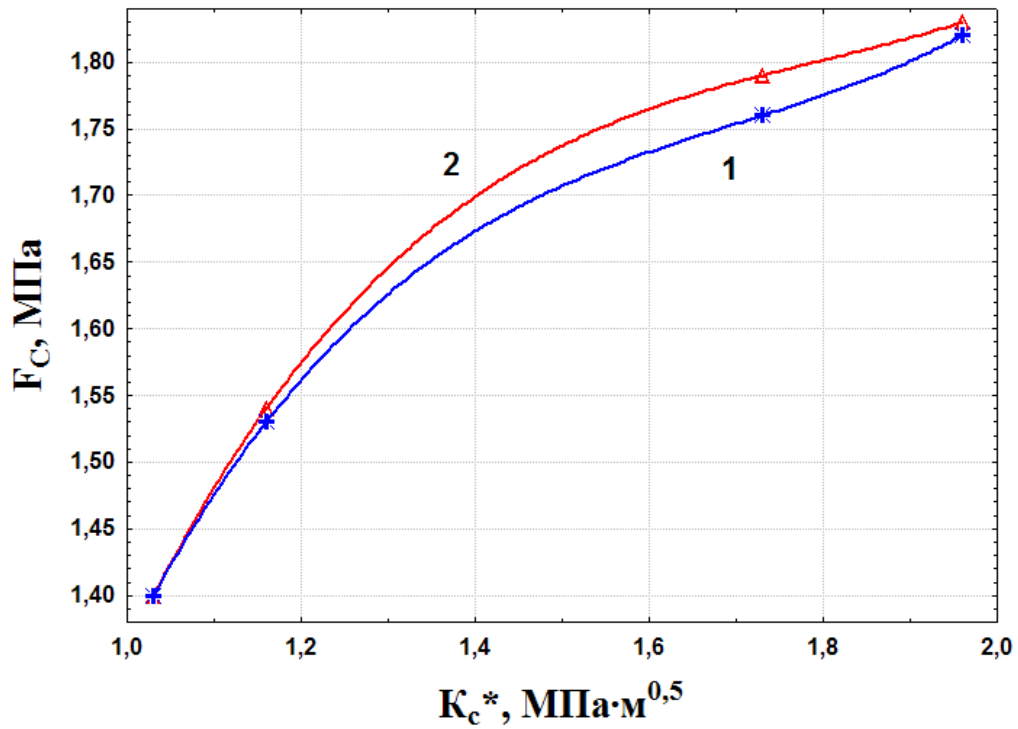


Рис. 5.2.5 - Зависимости трещиностойкости (вязкости разрушения) от разрушающей нагрузки, действующей на образец из мелкозернистого бетона:
1 – с обычной ПП - фиброй; 2 – с термообработанной ПП - фиброй.

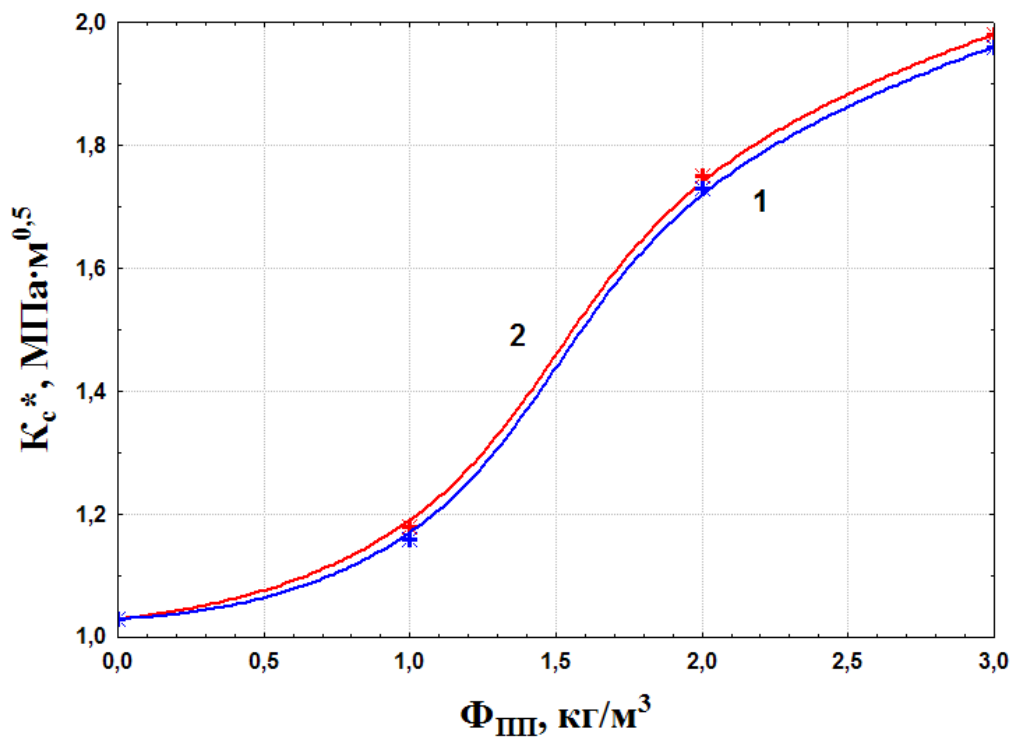


Рис. 5.2.6 - Зависимости трещиностойкости (вязкости разрушения) от расхода полипропиленовой фибры в мелкозернистом бетоне:
1 – с обычной ПП - фиброй; 2 – с термообработанной ПП - фиброй.

5.3 Прочностные свойства мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй при разных соотношениях песка и цемента

Как показывают многочисленные исследования [89; 38, с. 290; 124; 61], существенного уменьшения усадочных деформаций и трещин на всех уровнях структуры, а также повышения прочности бетона на растяжение, ударопрочности и вязкости разрушения можно достигнуть благодаря применению расширяющихся добавок и введению полимерных и других видов фибры в хрупкую цементную матрицу. В задачах оптимизации составов фибробетонов отсутствуют данные о влиянии волокон на прочностные характеристики фибробетонов при разных П/Ц.

При построении математической модели параметров равноподвижных жестких мелкозернистых фибробетонных смесей при различных соотношениях П/Ц составлена матрица планирования эксперимента (табл. 5.3.2), проанализированы и рассчитаны факторы и уровни варьирования (табл. 5.3.1).

Таблица 5.3.1

Факторы и уровни их варьирования для мелкозернистого фибробетона

Факторы	Значения интервалов варьирования				
	-1,68	-1	0	1	1,68
x_1 – водоцементное отношение (В/Ц)	0,354	0,385	0,43	0,475	0,506
x_2 – песчано-цементное отношение (П/Ц)	1,32	2	3	4	4,68
x_3 – расход ПП - фибры ($\Phi_{ПП}$), кг/м ³	0,32	1	2	3	3,68

Значения факторов определяются по формулам:

$$x_1 = \frac{B/C - 0,43}{0,045} \quad x_2 = \frac{P/C - 3}{1} \quad x_3 = \frac{\Phi_{ПП} - 2}{1}$$

Таблица 5.3.2

Матрица планирования эксперимента и результаты исследования технологических и прочностных свойств

№ п/п	Факторы			Структурные характеристики и свойства				
	X_1	X_2	X_3	C	W	R_{fb} , МПа	R_{ftb} , МПа	$\rho_{фсм}$, кг/м ³
1	0,385	2	1	0,399	0,265	48,7	4,65	2302,4
2	0,475	2	1	0,434	0,355	39,4	3,89	2227,3
3	0,385	4	1	0,209	0,145	45,5	4,49	2412,3

4	0,475	4	1	0,24	0,235	36,9	3,61	2357,5
5	0,385	2	3	0,397	0,265	46,3	4,58	2299,4
6	0,475	2	3	0,433	0,355	37,5	3,62	2224,4
7	0,385	4	3	0,209	0,145	43,4	4,21	2408,9
8	0,475	4	3	0,239	0,235	35,1	3,47	2354,3
9	0,354	3	2	0,272	0,174	49,9	4,91	2390,4
10	0,506	3	2	0,328	0,326	34,9	3,42	2283,1
11	0,43	1,32	2	0,535	0,351	36	3,56	2187,9
12	0,43	4,68	2	0,186	0,149	39,7	3,89	2407,2
13	0,43	3	0,32	0,302	0,25	42,8	4,19	2337,2
14	0,43	3	3,68	0,301	0,25	39,4	3,92	2331,9
15	0,43	3	2	0,301	0,25	41,1	4,08	2334,6
16	0,43	3	2	0,301	0,25	42,0	4,09	2334,6
17	0,43	3	2	0,301	0,25	41,6	4,1	2334,6
18	0,43	3	2	0,301	0,25	40,9	3,99	2334,6
19	0,43	3	2	0,301	0,25	41,4	4,01	2334,6
20	0,43	3	2	0,301	0,25	41,6	4,02	2334,6

На основании экспериментальных данных получены уравнения плотности фибробетонной смеси ($\rho_{\text{фсм}}$, кг/м³) и прочности немодифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй при сжатии (R_{fb} , МПа) и на растяжении при изгибе (R_{fb} , МПа) в возрасте 28 суток и построены их изоповерхности на рисунках 5.3.1 и 5.3.2:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{фсм}} = & 2586,62 - 1489,03 \cdot B / \text{Ц} + 90,13 \cdot \text{П} / \text{Ц} - 4,59 \cdot \Phi_{\text{мп}} + 492,94 \cdot B / \text{Ц}^2 - \\ & - 12,84 \cdot \text{П} / \text{Ц}^2 + 0,24 \cdot \Phi_{\text{мп}}^2 + 113,61 \cdot B / \text{Ц} \cdot \text{П} / \text{Ц} + 4,17 \cdot B / \text{Ц} \cdot \Phi_{\text{мп}} + \\ & + 0,06 \cdot \text{П} / \text{Ц} \cdot \Phi_{\text{мп}} \end{aligned} \quad (5.3.1)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{р}} = & 150,61 - 414,24 \cdot B / \text{Ц} + 3,51 \cdot \text{П} / \text{Ц} - 3,13 \cdot \Phi_{\text{мп}} + 350,92 \cdot B / \text{Ц}^2 - \\ & - 0,89 \cdot \text{П} / \text{Ц}^2 + 0,25 \cdot \Phi_{\text{мп}}^2 + 3,33 \cdot B / \text{Ц} \cdot \text{П} / \text{Ц} + 2,22 \cdot B / \text{Ц} \cdot \Phi_{\text{мп}} + \\ & + 0,05 \cdot \text{П} / \text{Ц} \cdot \Phi_{\text{мп}} \end{aligned} \quad (5.3.2)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{fb}} = & 11,59 - 26,99 \cdot B / \text{Ц} + 0,29 \cdot \text{П} / \text{Ц} - 0,05 \cdot \Phi_{\text{мп}} + 22,45 \cdot B / \text{Ц}^2 - 0,07 \cdot \text{П} / \text{Ц}^2 + \\ & + 0,02 \cdot \Phi_{\text{мп}}^2 + 0,16 \cdot B / \text{Ц} \cdot \text{П} / \text{Ц} + 0,1 \cdot B / \text{Ц} \cdot \Phi_{\text{мп}} + 0,01 \cdot \text{П} / \text{Ц} \cdot \Phi_{\text{мп}} \end{aligned} \quad (5.3.3)$$

Изоповерхности изменения прочностных характеристик (рис. 5.3.1 и 5.3.2) показывают, что значение критерия оптимизации П/Ц для обычных мелкозернистых бетонов и фибробетонов будет эффективно в пределах $2 \leq \text{П} / \text{Ц} \leq 4$. При низких П/Ц влияние полипропиленовой фибры на показатели прочности на растяжение при изгибе незначительны ввиду ее плохой анкеруемости в

цементном камне. Однако, введение микронаполнителей и применение специальных способов уплотнения позволит улучшить прочностные свойства.

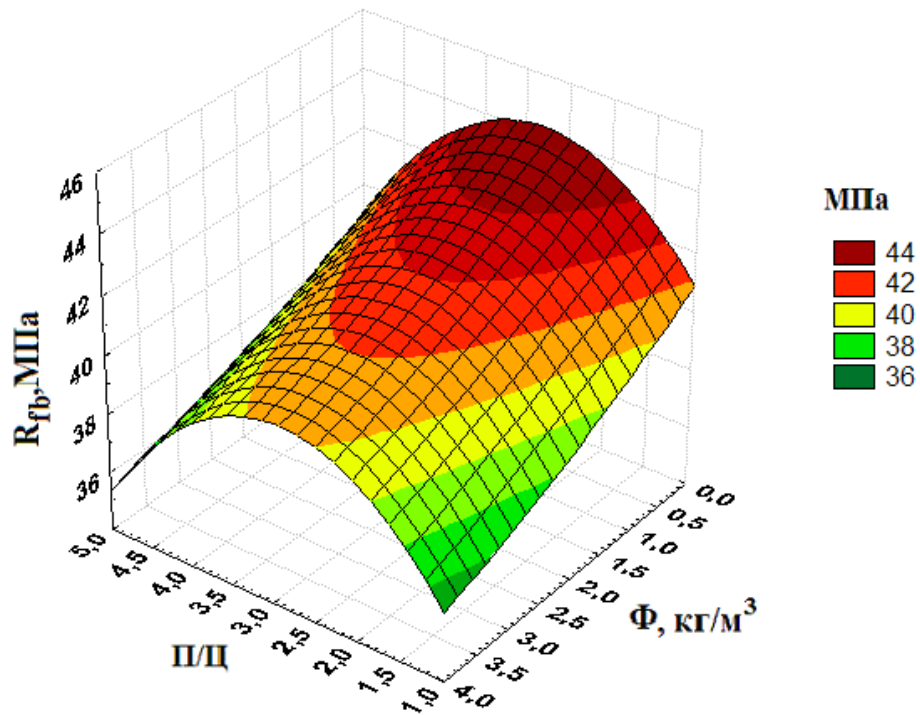


Рис. 5.3.1 - Изоповерхность изменения прочности при сжатии мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй при разных П/Ц.

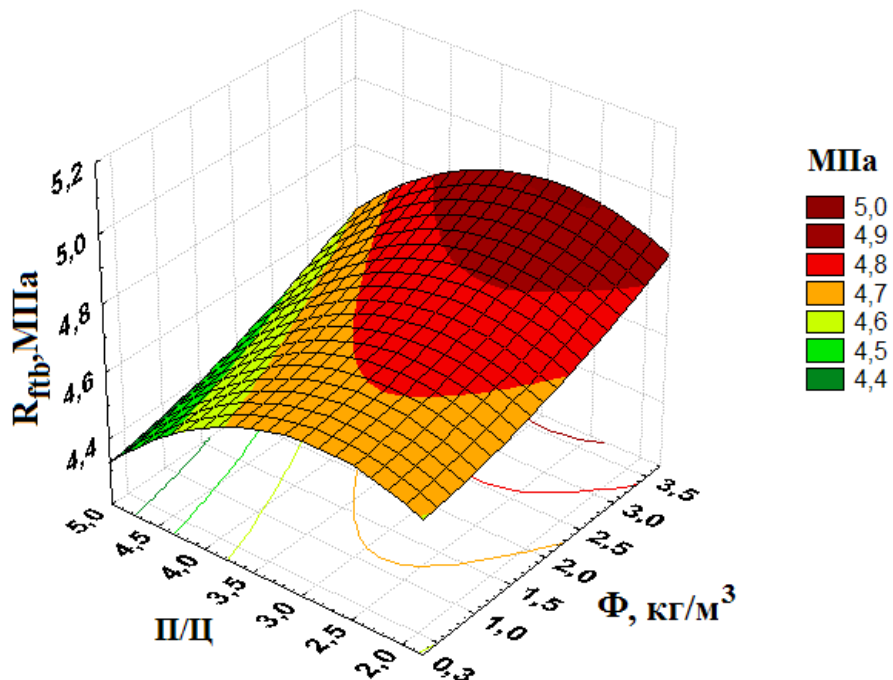


Рис. 5.3.2 - Изоповерхность изменения прочности на растяжение при изгибе мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй при разных П/Ц.

5.4 Прочностные свойства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Эффективными модификаторами структуры мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй являются минеральные и химические добавки, которые влияют на технологические свойства смеси и прочностные характеристики затвердевшего фибробетона.

В исследованиях составов мелкозернистых бетонов с П/Ц=3 [125] при использовании гиперпластификатора, микрокремнезема (МК = 8 % от МКВ) и полипропиленовых волокон были получены модифицированные фибробетоны с высокими прочностными характеристиками. Изоповерхности изменения плотности и прочности модифицированного фибробетона в зависимости от расхода гиперпластификатора и фибры при П/Ц = 3 показаны на рисунках 5.4.1, 5.4.2 и 5.4.3.

Полученные графики подтверждают эффективность применения модифицирующих компонентов. Так при $\Phi_{\text{пп}}=1,5\div 2,5$ кг/м³ и ГП=0,4÷0,7 % от МКВ прочностные характеристики мелкозернистого бетона возрастают до 2-х раз, плотность увеличивается до 1,1 раза в сравнении с контрольным составом.

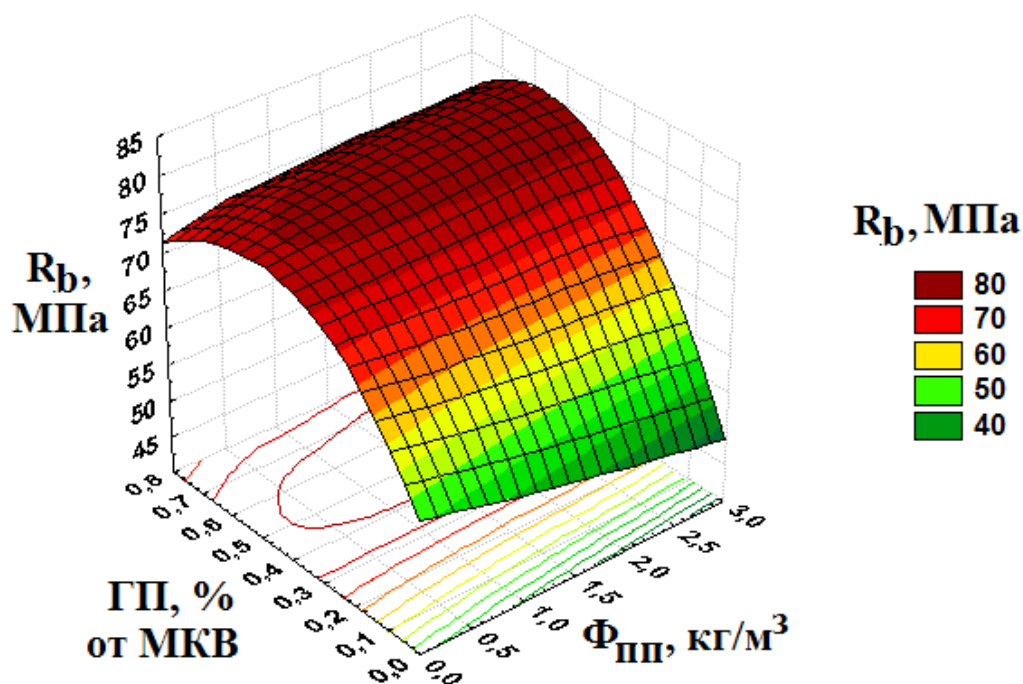


Рис. 5.4.1 – Изоповерхность изменения прочности фибробетона при сжатии

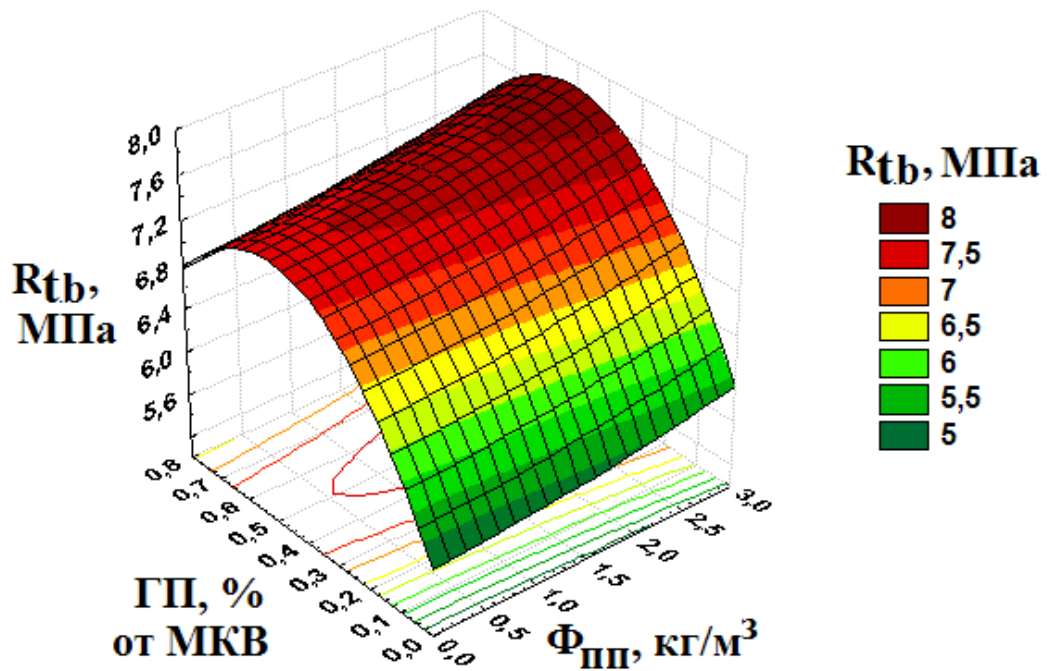


Рис. 5.4.2 – Изоповерхность изменения прочности фибробетона на растяжение при изгибе

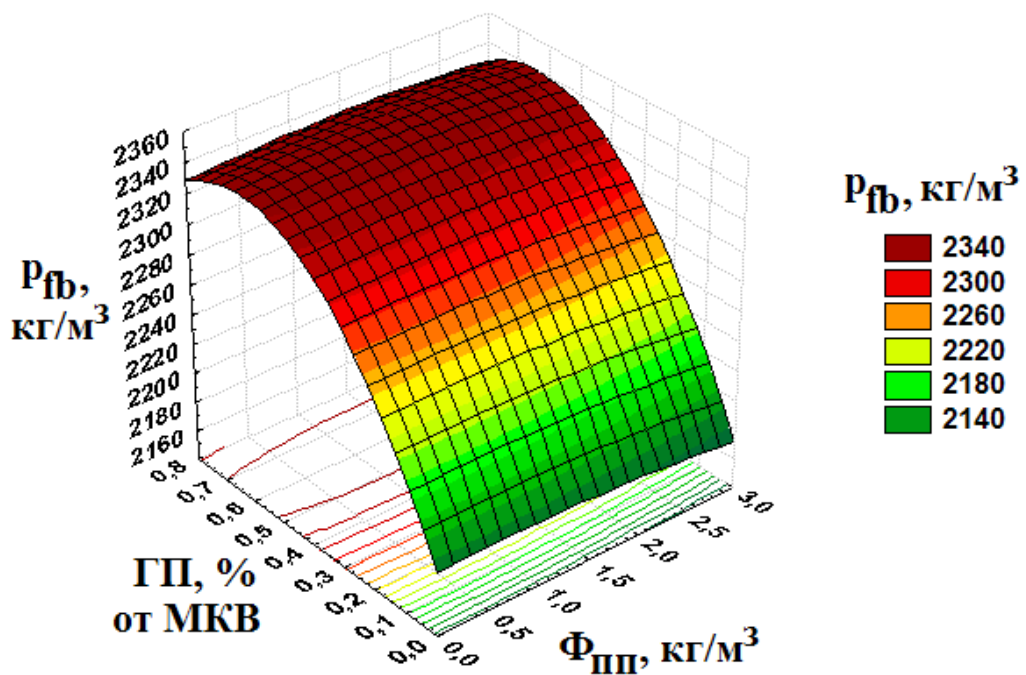


Рис. 5.4.3 – Изоповерхность изменения плотности фибробетона

На основании экспериментальных данных получены уравнения прогнозирования плотности, прочности при сжатии и на растяжение при изгибе модифицированного мелкозернистого фибробетона в возрасте 28 суток:

$$\begin{cases} R_{fb} = 57,32 - 2,06 \cdot \Phi_{III} + 83,55 \cdot ГП - 0,32 \cdot \Phi_{III}^2 - 84,87 \cdot ГП^2 + 6,42 \cdot \Phi_{III} \cdot ГП \\ R_{fcb} = 5,61 + 0,03 \cdot \Phi_{III} + 6,92 \cdot ГП + 0,03 \cdot \Phi_{III}^2 - 6,85 \cdot ГП^2 + 0,05 \cdot \Phi_{III} \cdot ГП \\ \rho_{fb} = 2183,81 + 2,01 \cdot \Phi_{III} + 520,81 \cdot ГП - 2,00 \cdot \Phi_{III}^2 - 424,77 \cdot ГП^2 + 4,78 \cdot \Phi_{III} \cdot ГП \end{cases} \quad (5.4.1)$$

Для анализа изменений плотности и прочностных характеристик модифицированных фибробетонов с разным соотношением между песком и цементом были определены факторы варьирования (таблица 5.4.1) и построена 4-х факторная модель планирования эксперимента (таблица 5.4.2).

Таблица 5.4.1

**Факторы и уровни их варьирования для модифицированного
мелкозернистого фибробетона**

Факторы	Значения интервалов варьирования				
	-2	-1	0	1	2
X ₁ – расход микрокремнезема (МК), % от МКВ	0	4	8	12	16
X ₂ – расход гиперпластификатора (ГП), % от МКВ	0	0,25	0,5	0,75	1
X ₃ – расход полипропиленовой фибры (Φ _{III}), кг/м ³	0	1	2	3	4
X ₄ – песчано-цементное отношение (П/Ц)	2	2,5	3	3,5	4

Значения факторов определяются по формулам:

$$X_1 = \frac{МК - 8}{4} \quad X_2 = \frac{ГП - 0,5}{0,25} \quad X_3 = \frac{\Phi_{III} - 2}{1} \quad X_4 = \frac{П / Ц - 3}{0,5}$$

Таблица 5.4.2

**Матрица планирования эксперимента и результаты исследования
технологических и прочностных свойств**

№ П/П	Факторы				Структурные характеристики и свойства					
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	C	W	B/B	R _{fb} , МПа	R _{fcb} , МПа	ρ _{fb} , кг/м ³
1	4	0,25	1	2,5	0,288	0,122	0,272	74,2	7,13	2427,8
2	12	0,25	1	2,5	0,305	0,153	0,303	68,9	6,82	2383,9
3	4	0,75	1	2,5	0,261	0,067	0,217	76,7	7,28	2477,9
4	12	0,75	1	2,5	0,277	0,091	0,241	71,5	6,97	2437,5
5	4	0,25	3	2,5	0,288	0,122	0,272	70,1	7,08	2424,5
6	12	0,25	3	2,5	0,304	0,153	0,303	65,5	6,76	2380,7
7	4	0,75	3	2,5	0,261	0,067	0,217	79,7	7,61	2474,6
8	12	0,75	3	2,5	0,276	0,091	0,241	74,5	7,3	2434,1
9	4	0,25	1	3,5	0,216	0,101	0,311	74,2	7,11	2437,6
10	12	0,25	1	3,5	0,231	0,132	0,342	68,9	6,79	2402,9

11	4	0,75	1	3,5	0,19	0,037	0,247	76,7	7,26	2483,4
12	12	0,75	1	3,5	0,203	0,062	0,272	71,5	6,95	2451,2
13	4	0,25	3	3,5	0,216	0,101	0,311	70,7	7,06	2434,2
14	12	0,25	3	3,5	0,23	0,132	0,342	65,5	6,75	2399,6
15	4	0,75	3	3,5	0,189	0,037	0,247	79,7	7,59	2479,9
16	12	0,75	3	3,5	0,203	0,062	0,272	74,5	7,29	2447,8
17	0	0,5	2	3	0,226	0,066	0,246	82,1	7,66	2476,3
18	16	0,5	2	3	0,256	0,12	0,3	71,7	7,06	2401,9
19	8	0	2	3	0,321	0,298	0,478	51,8	5,81	2289,2
20	8	1	2	3	0,217	0,04	0,22	74,6	7,23	2481,5
21	8	0,5	0	3	0,237	0,082	0,262	74,2	7,2	2451,1
22	8	0,5	4	3	0,241	0,093	0,273	73,3	7,08	2434,9
23	8	0,5	2	2	0,355	0,119	0,239	78,8	7,43	2422,7
24	8	0,5	2	4	0,183	0,067	0,307	70,3	7,03	2447,8
25	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	78,5	7,46	2438,3
26	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	77,9	7,47	2438,3
27	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	78,2	7,47	2438,3
28	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	78,0	7,4	2438,3
29	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	79,2	7,52	2438,3
30	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	78,7	7,46	2438,3
31	8	0,5	2	3	0,241	0,093	0,273	79,0	7,5	2438,3

На основании экспериментальных данных получены уравнения для расчета следующих показателей качества модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй: плотности (ρ_{fb} , кг/м³), прочности при сжатии (R_{fb} , МПа), прочности на растяжении при изгибе (R_{fb} , МПа):

$$\begin{aligned} \rho_{fb} = & 2402,33 - 10,29 \cdot МК + 337,07 \cdot ГП - 13,94 \cdot \Phi_{III} - 15,11 \cdot П / Ц + \\ & + 0,12 \cdot МК^2 - 184 \cdot ГП^2 + 2,91 \cdot \Phi_{III}^2 + 3,9 \cdot П / Ц^2 + 0,74 \cdot МК \cdot ГП + \\ & + 0,003 \cdot МК \cdot \Phi_{III} + 1,09 \cdot МК \cdot П / Ц - 0,1 \cdot ГП \cdot \Phi_{III} - 9,6 \cdot ГП \cdot П / Ц - \\ & - 0,05 \cdot \Phi_{III} \cdot П / Ц \end{aligned} \quad (5.4.2)$$

$$\begin{aligned} R_{fb} = & 30,83 - 0,223 \cdot МК + 64,17 \cdot ГП + 0,868 \cdot \Phi_{III} + 21,94 \cdot П / Ц - \\ & - 0,024 \cdot МК^2 - 60,87 \cdot ГП^2 - 1,167 \cdot \Phi_{III}^2 - 3,858 \cdot П / Ц^2 - 0,025 \cdot МК \cdot ГП + \\ & + 0,013 \cdot МК \cdot \Phi_{III} - 0,019 \cdot МК \cdot П / Ц + 6,6 \cdot ГП \cdot \Phi_{III} - 0,3 \cdot ГП \cdot П / Ц + \\ & + 0,075 \cdot \Phi_{III} \cdot П / Ц \end{aligned} \quad (5.4.3)$$

$$\begin{aligned} R_{fb} = & 4,73 - 0,021 \cdot МК + 3,81 \cdot ГП + 0,132 \cdot \Phi_{III} + 1,16 \cdot П / Ц - \\ & - 0,01 \cdot МК^2 - 3,68 \cdot ГП^2 - 0,075 \cdot \Phi_{III}^2 - 0,209 \cdot П / Ц^2 + 0,002 \cdot МК \cdot ГП + \\ & + 0,001 \cdot МК \cdot \Phi_{III} + 0,001 \cdot МК \cdot П / Ц + 0,383 \cdot ГП \cdot \Phi_{III} + 0,005 \cdot ГП \cdot П / Ц + \\ & + 0,004 \cdot \Phi_{III} \cdot П / Ц \end{aligned} \quad (5.4.4)$$

Полученные многофакторные уравнения показывают, что прочностные свойства модифицированных фибробетонов формируются благодаря положительному взаимодействию следующих факторов: $\Phi_{\text{ПП}}+\text{МК}$, $\Phi_{\text{ПП}}+\text{П/Ц}$ и $\Phi_{\text{ПП}}+\text{ГП}$. Таким образом, данные условия подтверждают эффективность применения полипропиленовой фибры в комплексе с другими модифицирующими компонентами.

На основании данных матрицы планирования эксперимента построены изоповерхности (рис. 5.4.3, 5.4.4 и 5.4.5) и установлены зависимости (5.4.5; 5.4.6) прочности и плотности бетона от структурных характеристик – объемной концентрации цементного теста C и истинного водовяжущего отношения W .

$$\begin{cases} R_{fb} = 53,81 + 164,65 \cdot C - 15,87 \cdot W - 108,46 \cdot C^2 + 137,67 \cdot W^2 - 543,44 \cdot C \cdot W \\ R_{fib} = 5,86 + 11,38 \cdot C - 2,37 \cdot W - 11,55 \cdot C^2 - 22,53 \cdot W^2 + 3,35 \cdot C \cdot W \end{cases} \quad (5.4.5)$$

$$\rho_{fb} = 2412,00 + 570,58 \cdot C - 412,49 \cdot W + 15,71 \cdot C^2 + 2505,19 \cdot W^2 - 4259,11 \cdot C \cdot W \quad (5.4.6)$$

Значения структурных характеристик C и W , определяющие технологические и физико – механические характеристики бетона и фибробетона, важны прежде всего при проектировании и оптимизации составов.

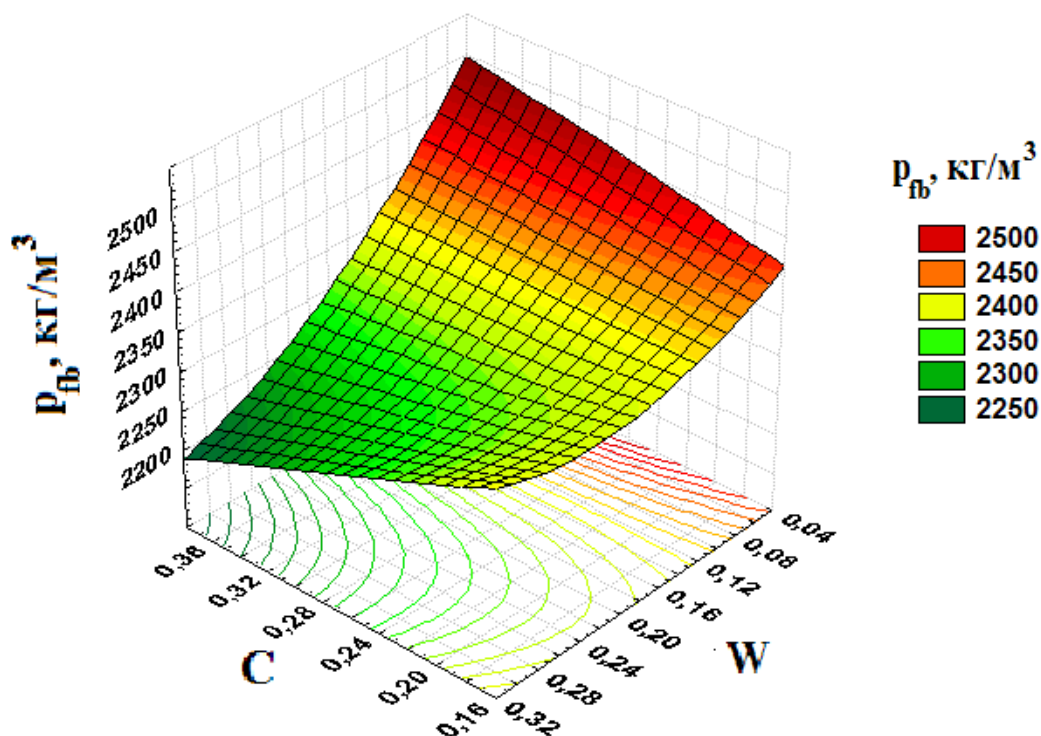


Рис. 5.4.3 – Изоповерхность изменения плотности ММФБ в зависимости от структурных характеристик

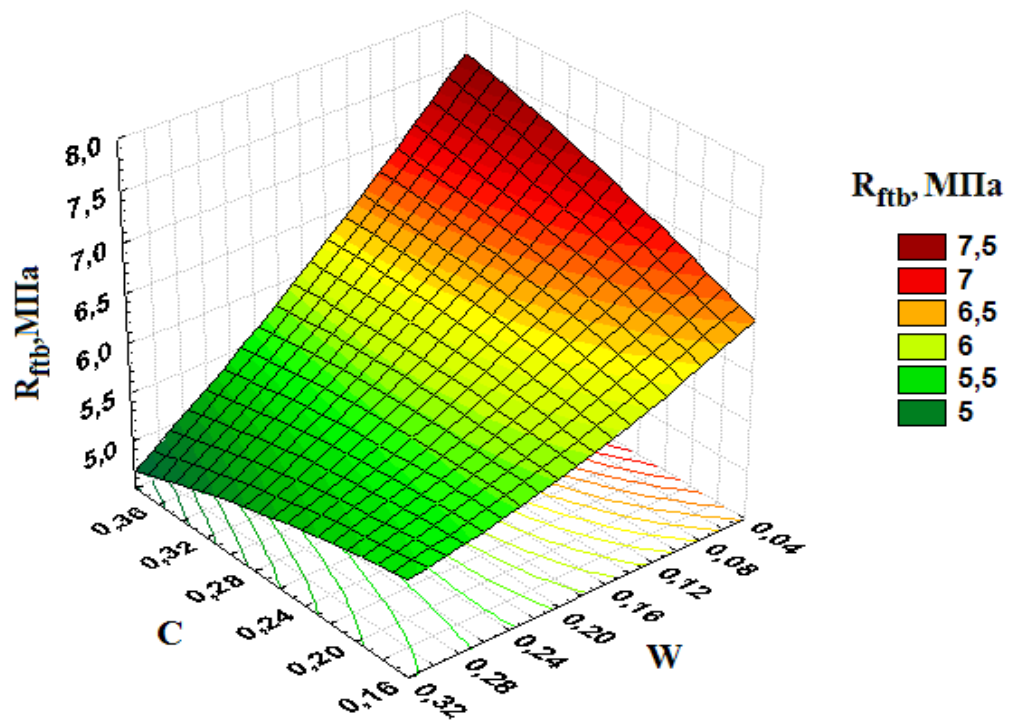


Рис. 5.4.4 – Изоповерхность изменения прочности на растяжение при изгибе ММФБ в зависимости от структурных характеристик

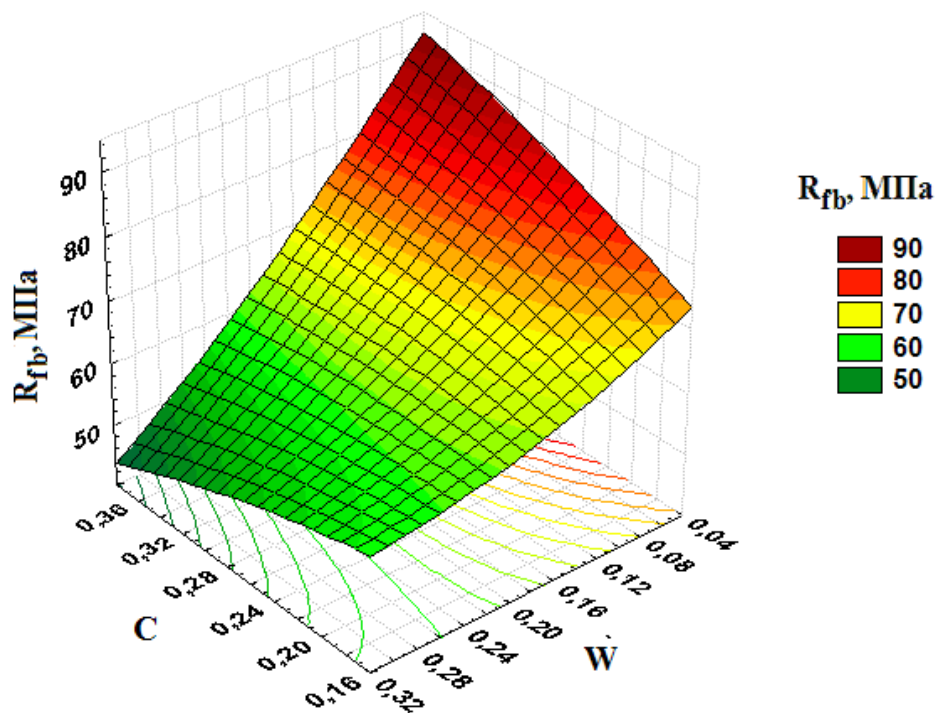


Рис. 5.4.5 – Изоповерхность изменения прочности при сжатии ММФБ в зависимости от структурных характеристик

Для анализа изменений плотности и прочностных характеристик модифицированных фибробетонов при разных соотношениях между песком и цементом с учетом структурных характеристик C и W были определены факторы

варьирования (таблица 5.4.3) и построена 5-и факторная модель планирования эксперимента (таблица 5.4.4).

Таблица 5.4.3

**Факторы и уровни их варьирования для модифицированного
мелкозернистого фибробетона**

Факторы	Значения интервалов варьирования				
	-2	-1	0	1	2
X_1 – объемная концентрация цементного теста (С)	0,232	0,234	0,236	0,238	0,24
X_2 – истинное водовяжущее отношение (W)	0,062	0,072	0,082	0,092	0,102
X_3 – расход гиперпластификатора (ГП), % от МКВ	0	0,25	0,5	0,75	1
X_4 – расход полипропиленовой фибры (Φ_{III}), кг/м ³	0	1	2	3	4
X_5 – расход микрокремнезема (МК), % от МКВ	0	4	8	12	16

Значения факторов определяются по формулам:

$$X_1 = \frac{C - 0,236}{0,002} \quad X_2 = \frac{W - 0,082}{0,01} \quad X_3 = \frac{ГП - 0,5}{0,25} \quad X_4 = \frac{\Phi_{III} - 2}{1} \quad X_5 = \frac{МК - 8}{4}$$

Таблица 5.4.4

**Матрица планирования эксперимента и результаты исследования
технологических и прочностных свойств**

№ п/п	Факторы					Структурные характеристики и свойства				
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	W	В/В	R_{fb} , МПа	R_{ftb} , МПа	ρ_{fb} , кг/м ³
1	0,234	0,072	0,25	3	12	576,04	0,248	75,46	6,63	2451,26
2	0,238	0,072	0,25	1	4	597,43	0,199	74,17	6,56	2497,69
3	0,234	0,092	0,25	1	4	559,31	0,314	63,62	5,92	2415,22
4	0,238	0,092	0,25	3	12	558,39	0,302	78,62	6,81	2406,8
5	0,234	0,072	0,75	1	4	587,39	0,225	76,71	6,7	2487,16
6	0,238	0,072	0,75	3	12	585,88	0,215	88,25	7,36	2476,95
7	0,234	0,092	0,75	3	12	549,01	0,329	54,48	5,32	2383,97
8	0,238	0,092	0,75	1	4	568,87	0,28	71,92	6,42	2440,27
9	0,234	0,072	0,25	1	4	587,39	0,228	90,46	7,48	2486,28
10	0,238	0,072	0,25	3	12	585,88	0,219	86,7	7,27	2476,07
11	0,234	0,092	0,25	3	12	549,01	0,333	65,52	6,04	2383,15
12	0,238	0,092	0,25	1	4	568,87	0,284	70,91	6,56	2439,42
13	0,234	0,072	0,75	3	12	576,04	0,244	76,68	6,7	2452,12

14	0,238	0,072	0,75	1	4	597,43	0,196	76,71	6,7	2482,58
15	0,234	0,092	0,75	1	4	559,31	0,313	64,02	5,94	2416,06
16	0,238	0,092	0,75	3	12	558,39	0,299	61,02	5,76	2407,63
17	0,232	0,082	0,5	2	8	562,76	0,295	67,03	6,13	2421,06
18	0,24	0,082	0,5	2	8	582,17	0,236	84,19	7,13	2470,05
19	0,236	0,062	0,5	2	8	601,66	0,181	92,9	7,68	2491,24
20	0,236	0,102	0,5	2	8	545,98	0,349	53,78	5,29	2378,69
21	0,236	0,082	0	2	8	572,46	0,265	73,94	6,54	2446,56
22	0,236	0,082	1	2	8	572,47	0,26	75,39	6,63	2446,67
23	0,236	0,082	0,5	0	8	572,47	0,268	77,8	6,77	2446,01
24	0,236	0,082	0,5	4	8	572,47	0,26	75,51	6,63	2445,62
25	0,236	0,082	0,5	2	0	583,32	0,242	86,52	7,26	2479,39
26	0,236	0,082	0,5	2	16	561,55	0,287	61,31	5,77	2412,21
27	0,236	0,082	0,5	2	8	572,47	0,264	79,19	7,02	2445,82
28	0,236	0,082	0,5	2	8	572,47	0,264	78,63	6,82	2447,6
29	0,236	0,082	0,5	2	8	572,47	0,264	80,13	6,9	2447,6
30	0,236	0,082	0,5	2	8	572,47	0,264	81,19	6,96	2447,6
31	0,236	0,082	0,5	2	8	572,47	0,264	79,5	6,87	2447,6
32	0,236	0,082	0,5	2	8	572,47	0,264	79,01	6,84	2447,6

На основании экспериментальных данных получены уравнения для расчета следующих показателей качества модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй с учетом структурных характеристик: плотности (ρ_{fb} , кг/м³), прочности при сжатии (R_{fb} , МПа), прочности на растяжении при изгибе (R_{fb} , МПа):

$$\begin{aligned} \rho_{fb} = & -4401,35 + 54483,6 \cdot C - 3425,49 \cdot W + 6,74 \cdot ГП + 1,06 \cdot \Phi - 1,22 \cdot МК - 101420 \cdot C^2 + \\ & + 4468,18 \cdot W^2 - 2,25 \cdot ГП^2 - 0,34 \cdot \Phi^2 - 0,02 \cdot МК^2 - 4093,75 \cdot C \cdot W - 16,25 \cdot C \cdot ГП - \\ & - 0,31 \cdot C \cdot \Phi - 17,89 \cdot C \cdot МК - 0,75 \cdot W \cdot ГП + 0,06 \cdot W \cdot \Phi + 18,58 \cdot W \cdot МК + 0,02 \cdot ГП \cdot \Phi - \\ & - 0,01 \cdot ГП \cdot МК + 0,03 \cdot \Phi \cdot МК \end{aligned} \quad (5.4.7)$$

$$\begin{aligned} R_{fb} = & -180268 + 152947 \cdot C + 396648 \cdot W - 134093 \cdot ГП + 7639 \cdot \Phi - 637 \cdot МК - 322642 \cdot C^2 + \\ & + 641932 \cdot W^2 - 24,43 \cdot ГП^2 - 1,03 \cdot \Phi^2 - 0,11 \cdot МК^2 - 21875 \cdot C \cdot W + 6210 \cdot C \cdot ГП - \\ & - 16312 \cdot C \cdot \Phi + 37,03 \cdot C \cdot МК - 907,5 \cdot W \cdot ГП - 306,5 \cdot W \cdot \Phi + 9,44 \cdot W \cdot МК - 2,94 \cdot ГП \cdot \Phi - \\ & - 2,43 \cdot ГП \cdot МК - 0,63 \cdot \Phi \cdot МК \end{aligned} \quad (5.4.8)$$

$$\begin{aligned} R_{fb} = & -1121,82 + 9552,46 \cdot C + 148,93 \cdot W - 75,57 \cdot ГП + 5,72 \cdot \Phi - 0,48 \cdot МК - 20227,3 \cdot C^2 + \\ & + 78,41 \cdot W^2 - 1,47 \cdot ГП^2 - 0,06 \cdot \Phi^2 - 0,01 \cdot МК^2 - 718,75 \cdot C \cdot W + 351,25 \cdot C \cdot ГП - \\ & - 15,31 \cdot C \cdot \Phi + 2,73 \cdot C \cdot МК - 53,25 \cdot W \cdot ГП - 16,69 \cdot W \cdot \Phi + 0,27 \cdot W \cdot МК - 0,18 \cdot ГП \cdot \Phi - \\ & - 0,14 \cdot ГП \cdot МК - 0,03 \cdot \Phi \cdot МК \end{aligned} \quad (5.4.9)$$

5.5 Морозостойкость и водонепроницаемость модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Для повышения надежности изделий и конструкций, работающих в суровых климатических условиях и агрессивных средах, особые требования предъявляются к исходным компонентам смеси и методам проектирования составов бетонов и фибробетонов. Срок службы таких конструктивных элементов во многом зависит от способности материала сохранять свои механические и эксплуатационные свойства без внешних признаков разрушения при многократных процессах замораживания и оттаивания, сопротивляться воздействию увлажнения и характеризуется марками бетона по морозостойкости и водонепроницаемости.

Морозостойкость и водонепроницаемость бетона в основном зависят от его структурных характеристик, качества применяемых материалов, капиллярной пористости и строения его порового пространства и обеспечиваются контролем и минимизацией вовлеченного воздуха и В/Ц-отношения бетонной смеси, применением химических добавок, оптимизацией расхода песка и повышением объемной концентрации цементного теста.

Ввиду тесной взаимосвязи морозостойкости и водонепроницаемости с плотностью, прочностью и усадкой структура и свойства бетона должны быть сформированы особым образом за счет применения тонкодисперсных наполнителей, добавок полифункционального действия и микроволокон.

Для определения влияния микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры на морозостойкость и водонепроницаемость бетона были приготовлены образцы-кубы с ребром 100 и 150 мм и испытаны в соответствии со стандартными методиками.

На рисунках 5.5.1 и 5.5.2 представлены соответственно зависимости изменения морозостойкости и водонепроницаемости мелкозернистого бетона от расхода гиперпластификатора, микрокремнезема и полипропиленовой фибры.

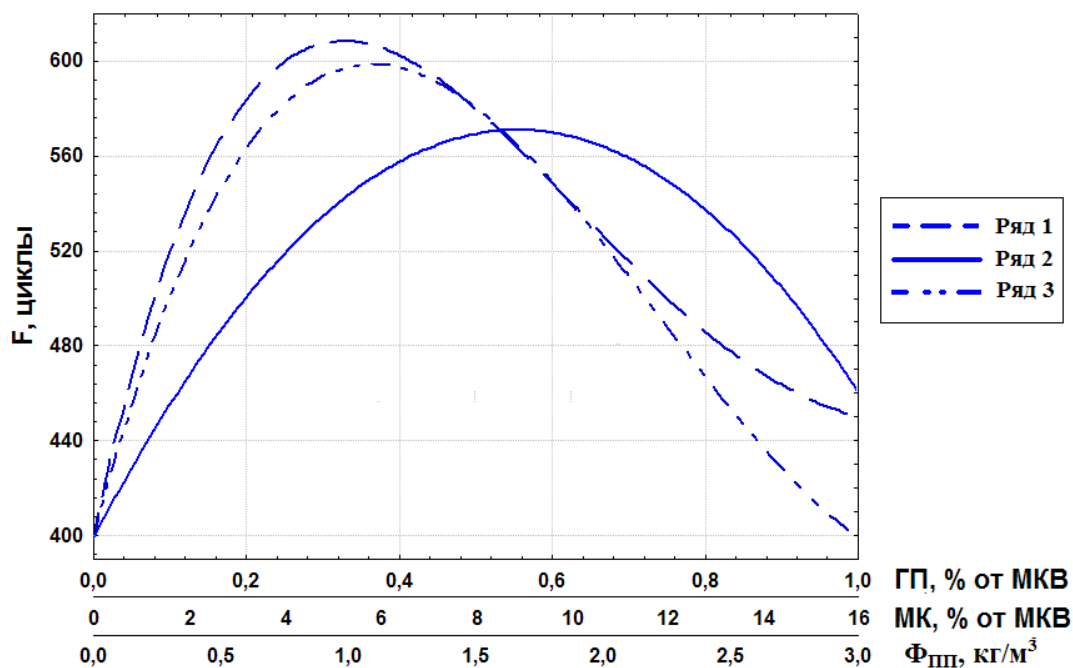


Рис. 5.5.1 – Зависимости изменения морозостойкости бетона от расхода:
1 – гиперпластификатора; 2 – микрокремнезема; 3 – полипропиленовой фибры

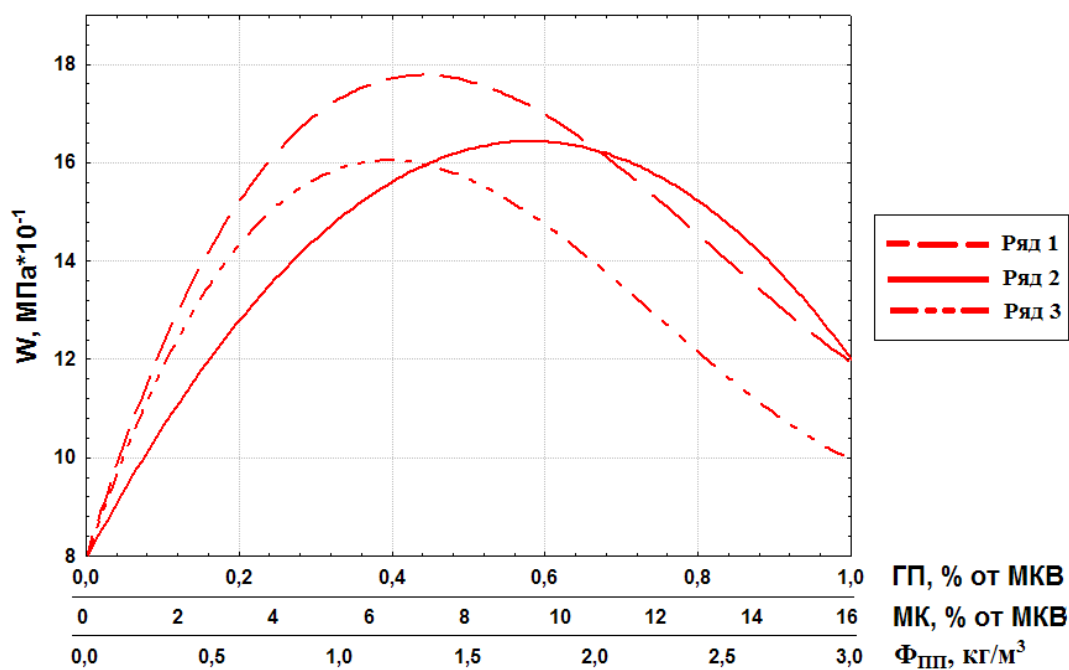


Рис. 5.5.2 – Зависимости изменения водонепроницаемости бетона от расхода:
1 – гиперпластификатора; 2 – микрокремнезема; 3 – полипропиленовой фибры

Известно, что недостатком водоредуцирующих добавок на основе поликарбоксилатов может быть газообразование и повышение воздухосодержания в бетонной смеси. Анализ графиков (рис. 5.5.1; 5.5.2) показал, что при расходе гиперпластификатора свыше 0,6 % от общей массы

вяжущего снижается морозостойкость и водонепроницаемость, что обусловлено увеличением капиллярной пористости бетона. Максимальный эффект достигнут при расходе ГП=0,25 ÷ 0,5 % от МКВ, при этом морозостойкость увеличилась в 1,5 раза, а водонепроницаемость – в 2,2 раза.

С введением в цемент микрокремнезема происходит уменьшение размера пор и уплотнение самой структуры цементного камня вследствие появления новообразований, что в значительной степени влияет на эксплуатационные свойства бетона. Однако в таких бетонах обязательно использование водоредуцирующих добавок ввиду увеличения нормальной плотности многокомпонентного вяжущего, а расход МК должен составлять не более 20 % от массы вяжущего. В данных исследованиях установлено, что микрокремнезем в дозировках 6÷12 % от МКВ положительно влияет на морозостойкость и водонепроницаемость бетона, при этом их показатели увеличиваются в 1,4 и 2 раза соответственно в сравнении с контрольным составом.

При расходе полипропиленовой фибры от 0,6 до 1,8 кг/м³ морозостойкость и водонепроницаемость бетона повышаются в 1,5 и 2 раза соответственно. Однако при увеличении дозировок волокон выявлено ухудшение эксплуатационных свойств, что связано с увеличением пористости бетона за счет выделения водорода в реакциях гидролиза моносиланов и образованием мелких пустот между волокнами вследствие неудовлетворительной диспергации или слипания.

При использовании микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры в оптимальных дозировках можно получить модифицированные мелкозернистые фибробетоны с высокими эксплуатационными характеристиками. При анализе графиков (рис. 5.5.1; 5.5.2) установлены зависимости, позволяющие прогнозировать морозостойкость и водонепроницаемость ММФБ на стадии проектирования составов:

$$F_1 = 500 + 9,2 * МК + 70 * ГП + 1183 * \Phi_{III} - 0,53 * МК^2 - 276,7 * ГП^2 - 50 * \Phi_{III}^2 \quad (5.5.1)$$

$$F_2 = 440 + 15,8 * МК + 35 * ГП + 59,2 * \Phi_{III} - 0,9 * МК^2 - 138,4 * ГП^2 - 25 * \Phi_{III}^2 - 736,5 * W + 455 * C + 441,5 * W^2 - 419 * C^2 \quad (5.5.2)$$

$$W = 8,67 + 1,6 * МК + 20 * ГП + 4,7 * \Phi_{III} - 0,08 * МК^2 - 37,33 * ГП^2 - 1,03 * \Phi_{III}^2 \quad (5.5.3)$$

Таким образом, полученные графики и зависимости позволяют определить оптимальное соотношение модифицирующих компонентов в бетоне и оценить эффективность бетона в зависимости от требований по условиям эксплуатации. Формула 5.5.2 позволяет определить морозостойкость с учетом параметров макроструктуры бетона – его структурных характеристик объемной концентрации цементного теста C и истинного водовяжущего отношения W .

Следует отметить, что для бетонов марок F400 – F600 необходимо применять цементы, в клинкере которых содержание C_3A не превышает 8 %, а расход воды затворения смеси должен быть не более 180 л/м³. Морозостойкость бетона значительно возрастает, когда капиллярная пористость менее 7 % [13, стр. 194]. Увеличение капиллярной пористости может быть вызвано уменьшением коэффициента уплотнения бетонной смеси, поэтому при высоких эксплуатационных требованиях к конструкциям следует уделять особое внимание методам и технологии укладки и вибрирования бетона. Обеспечение морозостойкости и водонепроницаемости изделий и конструкций, выполненных методом вибропрессования из смесей с низким В/Ц-отношением, возможно благодаря тепловлажностной обработке и созданию благоприятных условий при дальнейшем твердении.

5.6. Долговечность модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй

Показатели прочности, трещиностойкости, морозостойкости и водонепроницаемости определяют способность бетона противостоять внешним воздействиям и сохранять свои свойства в течение долгого времени эксплуатации. Долговечность бетона и фибробетона в данной работе оценивалась по результатам прочностных испытаний образцов, выдержанных в уличных условиях и подверженных особым атмосферным воздействиям (водонасыщение, высушивание, замораживание и т.д.) в течение 3-х лет.

Составы смесей и зависимости набора прочности бетонов и фибробетонов от времени твердения представлены в таблице 5.6.1 и на рисунке 5.6.1 соответственно.

Составы бетонных и фибробетонных смесей

№ П/П	Ц, кг	МК, кг	П, кг	Ф _{ПП} , кг	ГП, % от МКВ	V _{ОБЩ} , дм ³	$\frac{V}{V}$	$\rho_{см}$, кг/м ³
1	500	-	1500	-	-	215	0,43	2337,7
2	460	40	1500	-	-	238	0,476	2293,6
3	460	40	1500	1	0,25	166	0,332	2393,8
4	460	40	1500	2	0,25	166	0,332	2392,1
5	460	40	1500	3	0,25	166	0,332	2390,3

Таблица 5.6.1

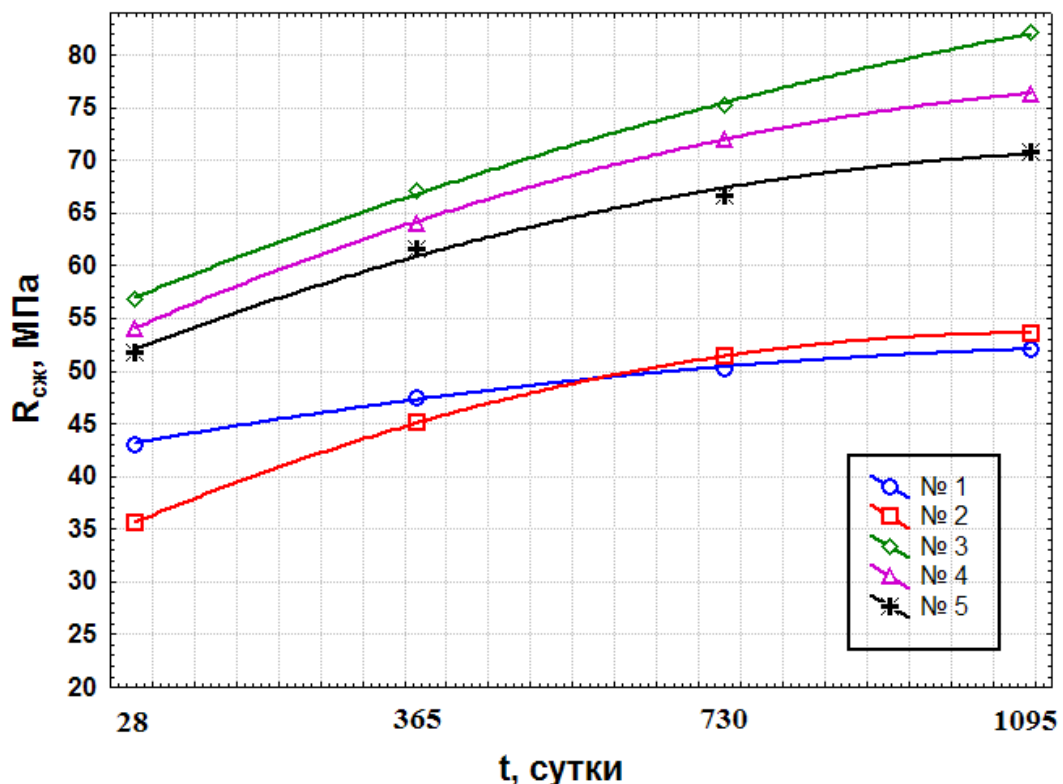


Рис. 5.5.2 – Зависимости набора прочности модифицированных бетонов и фибробетонов от времени твердения

Как видно из графиков, состав бетона с МК (№ 2) имеет меньшую прочность на 28 сутки в сравнении с контрольным, что обусловлено проявлением пуццолановой активности на поздних сроках твердения и росту новообразований – низкоосновных гидросиликатов кальция типа C-S-H (I). Однако особый интерес представляет «эффект микрокремнезема» при длительном хранении образцов, где прочность бетона увеличивается, несмотря на повышение водовяжущего

отношения. Это объясняется медленным протеканием реакций между продуктами гидратации и аморфным диоксидом кремния.

Увеличение расхода фибры приводит к незначительному снижению плотности и прочности фибробетонов даже с применением полифункциональных минеральных и химических добавок в течение всего времени твердения. Несмотря на это, модифицированные мелкозернистые фибробетоны имеют более лучшие технические характеристики в сравнении с контрольными составами. Так прочность при сжатии образцов (при расходе МК= 8 %; ГП=0,25 %; $\Phi_{\text{ПП}}=1$ кг/м³ ($\mu_v= 0,11$ %)) возросла на 18 % за первый год твердения, на 32 % - за два года и на 44 % за три года твердения.

Таким образом, модифицированные мелкозернистые фибробетоны способны не только сохранять свои свойства, но и улучшать их в первые годы твердения. Их применение в конструкциях, эксплуатируемых в особых условиях, позволило бы сократить межремонтный ресурс. Однако в настоящее время отсутствуют методики оценки технико-экономической эффективности и долговечности фибробетона, что сдерживает его применение в массовом строительстве.

5.7 Методика определения состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй

Проведенные исследования свойств модифицированных мелкозернистых смесей и бетонов с полипропиленовой фиброй позволили установить закономерности изменения технологических и физико-механических свойств, ставшие основой для определения состава фибробетона.

Расчет и оптимизация составов фибробетонов должны выполняться с учетом технологических (удобоукладываемость и воздухововлечение смеси), механических (прочность при сжатии и на растяжение при изгибе) и эксплуатационных (морозостойкость и водонепроницаемость) требований.

Подбор состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй должен заключаться в определении такого соотношения компонентов, при котором требуемые свойства смеси и фибробетона достигаются при минимальных расходах вяжущего, химических

добавок и фибры. Ввиду высокого водоредуцирующего эффекта гиперпластификатора, следует максимально точно производить дозировку материалов и соблюдать последовательность приготовления смесей.

Порядок определения состава фибробетона с требуемыми свойствами состоит из следующих этапов:

- подбор исходных материалов и исследование их свойств;
- расчет ориентировочного состава фибробетонной смеси;
- проведение опытных замесов и определение оптимальных расходов компонентов по технологическим требованиям;
- испытание образцов и корректировка составов фибробетонов;
- оценка технико – экономической эффективности и назначение рабочего состава.

Порядок действий при выполнении подбора состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй представлен на блок – схеме (рис. 5.6.1).

Рассмотрим примеры расчета состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй при помощи структурных характеристик и 4-х и 5-и факторных моделей и произведем прогнозирование его технологических и прочностных показателей качества.

Пример 1: Требуется определить состав мелкозернистого бетона на основе многокомпонентного вяжущего при введении гиперпластификатора и полипропиленовой фиброй по 5-и факторной модели со следующими требованиями:

- класс по прочности при сжатии B60;
- класс по прочности на растяжение при изгибе $B_{tb} 5,4$;
- удобоукладываемость Ж1 (5-10 сек) по ГОСТ 7473-2010;
- морозостойкость 400 циклов;
- водонепроницаемость $14 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$.

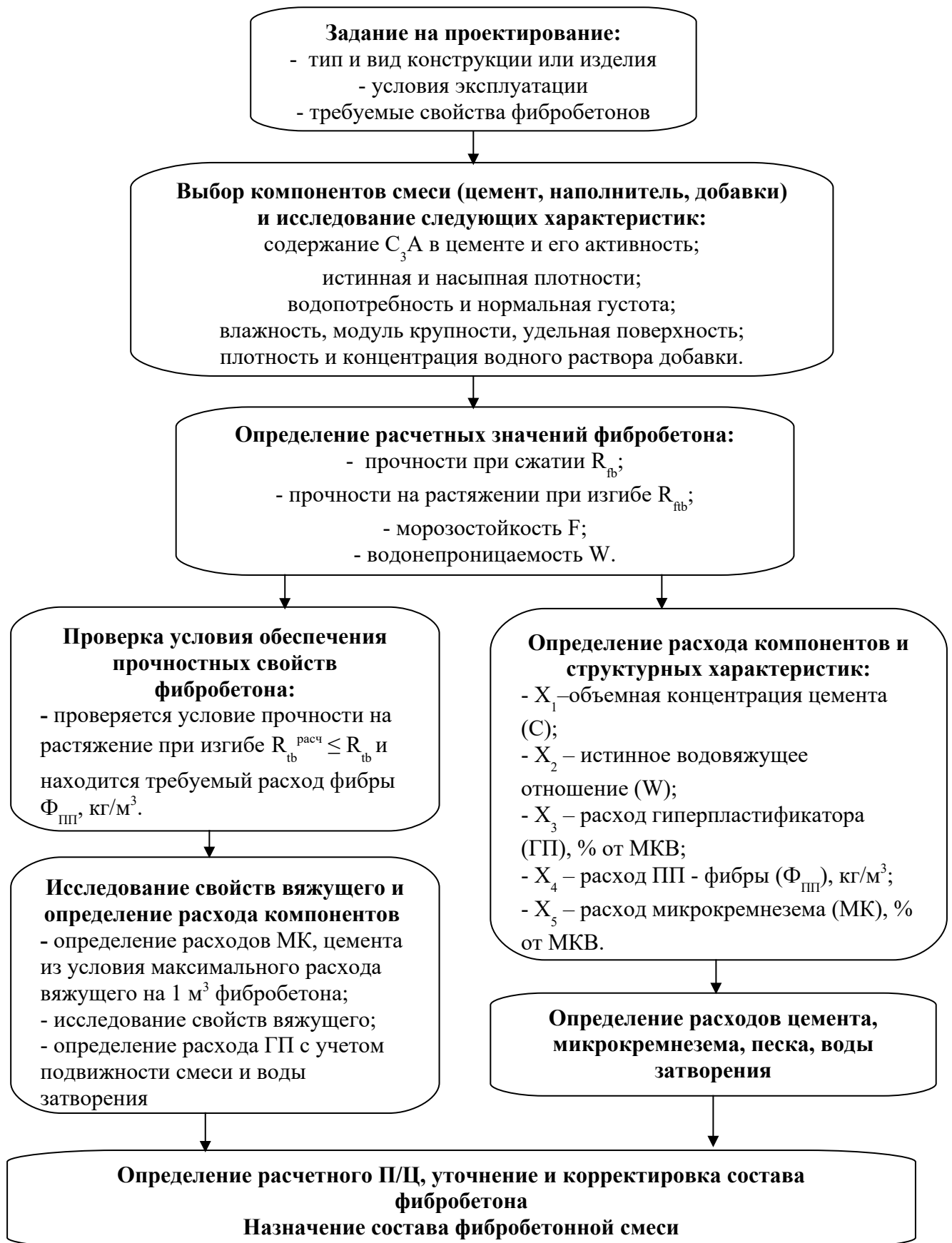


Рис. 5.7.1 - Алгоритм подбора состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй

1. Определяем характеристики применяемых материалов:

- портландцемент М500 (нормальная густота 25 %; плотность 3,1 т/м³; содержание С₃А = 7 %);
- микрокремнезем (истинная плотность 2,2 т/м³; водопотребность В_{МК}=85 %; содержание SiO₂ = 93,8 %);
- песок кварцевый (модуль крупности М_к=2,73; плотность 2,626 т/м³; водопотребность В_п=6 %);
- гиперпластификатор Stachement 2061/151.2 (плотность 1,097 т/м³; концентрация К = 30 %);
- полипропиленовая фибра (длина L = 18 мм; диаметр D = 20 мкм).

2. Требуемые сопротивления бетона осевому сжатию R_b и растяжению при изгибе R_{tb} из мелкозернистого бетона и фибробетона находим по формуле:

$$R_b = B \cdot K_T = 60 \cdot 1,28 = 76,8 \text{ МПа}$$

$$R_{tb} = B_{tb} \cdot K_T = 5,4 \cdot 1,28 = 6,9 \text{ МПа}$$

где B, B_{tb} - классы бетона по прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, МПа; K_T = 1,28 - коэффициент требуемой прочности для всех видов бетонов (кроме плотного силикатного и ячеистого).

Подбор состава:

1. Решение системы уравнений 5.4.7, 5.4.8, 5.4.9, 5.5.2 и 5.5.3:

$$2460 = -4401,35 + 54483,6 \cdot C - 3425,49 \cdot W + 6,74 \cdot ГП + 1,06 \cdot \Phi - 1,22 \cdot МК - 101420 \cdot C^2 + \\ + 4468,18 \cdot W^2 - 2,25 \cdot ГП^2 - 0,34 \cdot \Phi^2 - 0,02 \cdot МК^2 - 4093,75 \cdot C \cdot W - 16,25 \cdot C \cdot ГП - \\ - 0,31 \cdot C \cdot \Phi - 17,89 \cdot C \cdot МК - 0,75 \cdot W \cdot ГП + 0,06 \cdot W \cdot \Phi + 18,58 \cdot W \cdot МК + 0,02 \cdot ГП \cdot \Phi - \\ - 0,01 \cdot ГП \cdot МК + 0,03 \cdot \Phi \cdot МК$$

$$76,8 = -180268 + 152947 \cdot C + 3966,48 \cdot W - 1340,93 \cdot ГП + 76,39 \cdot \Phi - 6,37 \cdot МК - 322642 \cdot C^2 + \\ + 6419,32 \cdot W^2 - 24,43 \cdot ГП^2 - 1,03 \cdot \Phi^2 - 0,11 \cdot МК^2 - 21875 \cdot C \cdot W + 6210 \cdot C \cdot ГП - \\ - 163,12 \cdot C \cdot \Phi + 37,03 \cdot C \cdot МК - 907,5 \cdot W \cdot ГП - 306,5 \cdot W \cdot \Phi + 9,44 \cdot W \cdot МК - 2,94 \cdot ГП \cdot \Phi - \\ - 2,43 \cdot ГП \cdot МК - 0,63 \cdot \Phi \cdot МК$$

$$6,9 = -112182 + 9552,46 \cdot C + 14893 \cdot W - 75,57 \cdot ГП + 5,72 \cdot \Phi - 0,48 \cdot МК - 20227,3 \cdot C^2 + \\ + 78,41 \cdot W^2 - 1,47 \cdot ГП^2 - 0,06 \cdot \Phi^2 - 0,01 \cdot МК^2 - 718,75 \cdot C \cdot W + 351,25 \cdot C \cdot ГП - \\ - 15,31 \cdot C \cdot \Phi + 2,73 \cdot C \cdot МК - 53,25 \cdot W \cdot ГП - 16,69 \cdot W \cdot \Phi + 0,27 \cdot W \cdot МК - 0,18 \cdot ГП \cdot \Phi - \\ - 0,14 \cdot ГП \cdot МК - 0,03 \cdot \Phi \cdot МК$$

$$400 = 440 + 15,8 * MK + 35 * ГП + 59,2 * \Phi_{III} - 0,9 * MK^2 - 138,4 * ГП^2 - 25 * \Phi_{III}^2 - 736,5 * W + 455 * C + 441,5 * W^2 - 419 * C^2$$

$$14 = 8,67 + 1,6 * MK + 20 * ГП + 4,7 * \Phi_{III} - 0,08 * MK^2 - 37,33 * ГП^2 - 1,03 * \Phi_{III}^2$$

В результате получаем значения факторов:

$$C = 0,228; W = 0,0625; ГП = 0,75 \%; \Phi_{III} = 3,5; MK = 8 \%$$

2. По формуле 1.2.1. определяем расход цемента:

$$MKB = \frac{0,228 \cdot 1000}{\left(\frac{1}{3,028} + 0,0625\right)} = 580,5 \text{ кг}$$

Определяем расход добавок:

$$ГП = 0,75 \cdot 580,5 / 30 = 14,5 \text{ кг} - \text{жидкой добавки}$$

$$MK = 0,01 \cdot 8 \cdot 580,5 = 46,4 \text{ кг}; Ц = 580,5 - 46,4 = 534,1 \text{ кг}$$

3. Определяем долю остальных компонентов смеси по формуле:

$$S = 1 - C = 1 - 0,228 = 0,772$$

Решаем систему уравнений:

$$S = 0,001 \cdot \left(\frac{П}{\rho_{П}} + \frac{ГП}{\rho_{ГП}} + \frac{\Phi_{III}}{\rho_{III}} + B \right) = 0,772$$

Расход воды, приходящийся на вяжущее:

$$B_{MKB} = MKB \cdot W = 580,5 \cdot 0,0625 = 36,3 \text{ л}$$

4. Принимаем соотношение между песком и вяжущим – П/Ц = 3.

$$\text{Тогда расход песка будет равен: } П = MKB \cdot П/Ц = 580,5 \cdot 3 = 1741,5 \text{ кг}$$

5. Определяем расход воды с учетом водопотребности наполнителя и количества воды в растворе добавки:

$$B_3 = 0,01 \cdot П \cdot B_{П} + ГП \cdot \left(\frac{1}{K} - 0,01 \right) = 0,01 \cdot 1741,5 \cdot 6 + 0,75 \cdot \left(\frac{1}{30} - 0,01 \right) = 104,5 \text{ л}$$

Общий расход воды будет равен:

$$B = B_{MKB} + B_3 = 104,5 + 36,3 = 140,8 \text{ л.}$$

6. Проверяем условие и находим требуемый расход наполнителя:

$$\begin{aligned} П &= 0,001 \cdot \rho_{П} \cdot \left(0,772 - \left(\frac{ГП}{\rho_{ГП}} + \frac{\Phi_{III}}{\rho_{III}} + B \right) \right) = \\ &= 0,001 \cdot 2,626 \cdot \left(0,772 - 0,001 \cdot \left(\frac{14,51}{1,097} + \frac{3,5}{0,910} + 140,8 \right) \right) = 1741,0 \text{ кг} \end{aligned}$$

7. Принимаем расчетное П/Ц = 3

8. Назначаем состав фибробетонной смеси на $V_{см} = 1 \text{ м}^3$:

- Цемент – 534,1 кг;
- Микрокремнезем – 46,4 кг (8 % от МКВ);
- Песок кварцевый – 1741 кг;
- Гиперпластификатор жидкий – 14,5 л (0,75 % от МКВ);
- Полипропиленовая фибра – 3,5 кг;
- Вода – 140,8 л.

Пример 2: Требуется определить состав модифицированного мелкозернистого фибробетона для жесткого аэродромного покрытия, рассчитанного на внекатегорийную нагрузку, со следующими требованиями:

- класс по прочности при сжатии - В40;
- класс по прочности на растяжение при изгибе - $B_{тб} 4,4$;
- морозостойкость - 300 циклов;
- водонепроницаемость - $8 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$;
- подвижность - ПЗ (ОК=10-15 см) по ГОСТ 7473-2010;
- метод изготовления конструкции – подача смеси автобетононасосом и уплотнение глубинными вибраторами.

1. Определяем характеристики применяемых материалов:

Виды материалов и их технические характеристики аналогичны примеру 1.

2. Требуемые сопротивления бетона осевому сжатию R_b и растяжению при изгибе $R_{тб}$ находим по формуле:

$$R_b = B \cdot K_T = 40 \cdot 1,28 = 51,2 \text{ МПа}$$

$$R_{тб} = B_{тб} \cdot K_T = 4,4 \cdot 1,28 = 5,632 \text{ МПа}$$

3. Определяем расчетную прочность бетона на растяжение при изгибе:

$$R_{тб}^{расч} = 0,08 \cdot (10 \cdot R_b)^{2/3} = 0,08 \cdot (10 \cdot 51,2)^{2/3} = 5,12 \text{ МПа}$$

Поскольку $R_{тб}^{расч} \leq R_{тб}$, то производим расчет требуемого содержания фибры, необходимой для компенсации прочностных свойств:

$$\Phi_{ПП} = \frac{R_{тб} - R_{тб}^{расч}}{K_{тб}} = \frac{5,632 - 5,12}{0,148} \approx 3,5 \text{ кг/м}^3$$

где $\Phi_{\text{ПП}}$ – расход полипропиленовой фибры, кг/м³; $K_{\text{в}}=0,148$ – коэффициент влияния полипропиленовой фибры на прочность на растяжение при изгибе.

4. Принимаем максимальный расход цемента для класса бетона от В40 – 500 кг/м³ в соответствии с СП 46.13330.2012 «Мосты и трубы» (табл. Е1, п. 2).

5. Оптимальное количество микрокремнезема в составе вяжущего определяется по следующей зависимости:

$$MK = \left| \frac{125 - 2 \cdot R_b + 0,03 \cdot R_{\text{Ц}}}{C_{\text{max}}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{125 - 2 \cdot 51,2 + 0,03 \cdot 60,88}{500} \right| \cdot 100\% \approx 5\%$$

где МК – расход микрокремнезема, % от общей массы вяжущего; $R_{\text{Ц}}$ – активность цемента, МПа.

Тогда расход цемента в составе многокомпонентного вяжущего (МКВ) будет находиться по формуле:

$$C = C_{\text{max}} \cdot (1 - 0,01 \cdot MK) = 500 \cdot (1 - 0,01 \cdot 5) = 475 \text{ кг}$$

6. Определяем основные показатели многокомпонентного вяжущего по формулам (6), (7) и (8):

- Общая масса на 1 м³ бетона и фибробетона:

$$MKB = C + 0,01 \cdot MK \cdot C_{\text{max}} = 475 + 0,01 \cdot 5 \cdot 500 = 500 \text{ кг}$$

- Истинная плотность:

$$\rho_{MKB} = \rho_{\text{Ц}} - 0,01 \cdot MK \cdot (\rho_{\text{Ц}} - \rho_{MK}) = 3,1 - 0,01 \cdot 5 \cdot (3,1 - 2,2) = 3,055 \text{ т/м}^3$$

- Активность (предел прочности при сжатии):

$$R_{MKB} = R_{\text{Ц}} - 0,002 \cdot MK^3 + 0,019 \cdot MK^2 - 0,294 \cdot MK = 60,88 - 0,002 \cdot 5^3 + 0,019 \cdot 5^2 - 0,294 \cdot 5 = 59,64 \text{ МПа}$$

7. Определяем требуемое водовязущее отношение:

$$\left(\frac{B}{B} \right)_{\text{TP}} = \frac{0,386 \cdot R_{MKB}}{R_b + 0,165 \cdot R_{MKB}} = \frac{0,386 \cdot 59,64}{51,2 + 0,165 \cdot 59,64} = 0,377$$

8. Ориентировочный расход гиперпластификатора и коэффициент влияния добавки определяем по формуле 4.3.3 и таблице 4.3.1:

$$\Gamma\Pi = 10^{k_{\text{inf}}} = 10^{-0,075} = 0,84\%$$

$$k_{\text{inf}} = \frac{0,37 - (B/B)_{\text{TP}}}{0,093} = \frac{0,37 - 0,377}{0,093} = -0,075$$

9. Требуемое количество воды затворения находим с учетом концентрации водного раствора химической добавки по формуле:

$$B_{TP} = MKB \cdot \left(\left(\frac{B}{B} \right)_{TP} - \Gamma\Pi \cdot \left(\frac{1}{K} - 0,01 \right) \right) = 500 \cdot \left(0,377 - 0,84 \cdot \left(\frac{1}{30} - 0,01 \right) \right) = 178,7 \text{ л}$$

10. Определяем оптимальное соотношение между песком и вяжущим по формуле (12) и расход песка:

$$n = \rho_{\Pi} \cdot \left(\left(\frac{1000 - 1,099 \cdot \Phi_{III} - 10 \cdot BB}{MKB} \right) - \left(\frac{1}{\rho_{MKB}} + \left(\frac{B}{B} \right)_{TP} + 0,01 \cdot \frac{\Gamma\Pi}{\rho_{\Gamma\Pi}} \right) \right) =$$

$$= 2,626 \cdot \left(\left(\frac{1000 - 1,099 \cdot 3,5 - 10 \cdot 2}{500} \right) - \left(\frac{1}{3,055} + 0,377 + 0,01 \cdot \frac{0,84}{1,426} \right) \right) = 3,26$$

$$\Pi = MKB \cdot n = 500 \cdot 3,26 = 1630 \text{ кг}$$

11. Расчетная плотность и выход фибробетонной смеси составят:

$$\rho_{fb} = 475 + 25 + 1630 + 4,2 + 188,5 + 3,5 = 2326,2 \text{ кг/м}^3$$

$$V_{fb} = 153,22 + 11,36 + 620,71 + 2,94 + 188,5 + 3,85 + 20 = 1000,0 \text{ л}$$

12. Находим значения структурных характеристик С и W:

- истинное водовязущее отношение W:

$$W = \left(\frac{B - B_{3АП}}{MKB} \right) = \left(\frac{188,5 - 97,8}{500} \right) = 0,181$$

где $B_{3АП} = 0,01 \cdot MKB \cdot n \cdot B_{\Pi} = 0,01 \cdot 500 \cdot 3,26 \cdot 6 = 97,8 \text{ л}$

- объемная концентрация цементного теста с МК (C_{MKB}):

$$C_{MKB} = \frac{MKB}{1000} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{MKB}} + W \right) = \frac{500}{1000} \cdot \left(\frac{1}{3,055} + 0,181 \right) = 0,254$$

12. Проверяем полученные результаты по формулам 5.4.3, 5.4.4, 5.4.5 и 5.4.6:

$$R_{fb} = 78,8 - 2,583 \cdot 5 + 3,85 \cdot 0,84 - 0,175 \cdot 3,5 - 0,682 \cdot 3,26 - 0,38 \cdot 5^2 - 3,8 \cdot \Gamma\Pi^2 - 1,167 \cdot 3,5^2 -$$

$$- 0,965 \cdot 3,26^2 - 0,025 \cdot 5 \cdot 0,84 + 0,05 \cdot 5 \cdot 3,5 - 0,038 \cdot 5 \cdot 3,26 + 1,65 \cdot 0,84 \cdot 3,5 - 0,038 \cdot 0,84 \cdot 3,26 +$$

$$+ 0,038 \cdot 3,5 \cdot 3,26 = 56,4 \text{ МПа}$$

$$R_{fib} = 7,47 - 0,154 \cdot 5 + 0,233 \cdot 0,84 + 0,037 \cdot 3,5 - 0,04 \cdot 3,26 - 0,02 \cdot 5^2 - 0,23 \cdot 0,84^2 -$$

$$- 0,075 \cdot 3,5^2 - 0,052 \cdot 3,26^2 + 0,002 \cdot 5 \cdot 0,84 + 0,001 \cdot 5 \cdot 3,5 + 0,001 \cdot 5 \cdot 3,26 +$$

$$+ 0,096 \cdot 0,84 \cdot 3,5 + 0,001 \cdot 0,84 \cdot 3,26 + 0,002 \cdot 3,5 \cdot 3,26 = 5,64 \text{ МПа}$$

$$R_{fb} = 53,81 + 164,65 \cdot 0,254 - 15,87 \cdot 0,181 - 108,46 \cdot 0,254^2 - 543,44 \cdot 0,254 \cdot 0,181 +$$

$$+ 137,67 \cdot 0,181^2 = 55,3 \text{ МПа}$$

$$\rho_{fb} = 2412,00 + 570,58 \cdot 0,254 - 412,49 \cdot 0,181 + 15,71 \cdot 0,254^2 - 4259,11 \cdot 0,254 \cdot 0,181 + 137,67 \cdot 0,181^2 = 2337,5 \text{ кг} / \text{м}^3$$

13. Находим прогнозируемое значение морозостойкости и водонепроницаемости ММФБ по формулам 5.5.1, 5.5.2 и 5.5.3:

$$F_1 = 500 + 9,2 \cdot МК + 70 \cdot ГП + 118,3 \cdot \Phi_{III} - 0,53 \cdot МК^2 - 276,7 \cdot ГП^2 - 50 \cdot \Phi_{III}^2 = \\ = 500 + 9,2 \cdot 5 + 70 \cdot 0,84 + 118,3 \cdot 3,5 - 0,53 \cdot 5^2 - 276,7 \cdot 0,84^2 - 50 \cdot 3,5^2 = 325 \text{ циклов}$$

$$F_2 = 440 + 15,8 \cdot МК + 35 \cdot ГП + 59,2 \cdot \Phi_{III} - 0,9 \cdot МК^2 - 138,4 \cdot ГП^2 - 25 \cdot \Phi_{III}^2 - \\ - 736,5 \cdot W + 455 \cdot C + 441,5 \cdot W^2 - 419 \cdot C^2 = 440 + 15,8 \cdot 5 + 35 \cdot 0,84 + 59,2 \cdot 3,5 - 0,9 \cdot 5^2 - \\ - 138,4 \cdot 0,84^2 - 25 \cdot 3,5^2 - 736,5 \cdot 0,181 + 455 \cdot 0,254 + 441,5 \cdot 0,181^2 - 419 \cdot 0,254^2 = 350 \text{ циклов}$$

$$W = 8,67 + 1,6 \cdot МК + 20 \cdot ГП + 4,7 \cdot \Phi_{III} - 0,08 \cdot МК^2 - 37,33 \cdot ГП^2 - 1,03 \cdot \Phi_{III}^2 = \\ = 8,67 + 1,6 \cdot 5 + 20 \cdot 0,84 + 4,7 \cdot 3,5 - 0,08 \cdot 5^2 - 37,33 \cdot 0,84^2 - 1,03 \cdot 3,5^2 = 9 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$$

14. Назначаем состав фибробетонной смеси ($V_{CM} = 1 \text{ м}^3$):

- Цемент – 475 кг;
- Микрокремнезем – 25 кг (5 % от МКВ);
- Песок кварцевый – 1630 кг;
- Гиперпластификатор жидкий – 14 л (0,84 % от МКВ);
- Полипропиленовая фибра – 3,5 кг;
- Вода – 178,7 л.

С помощью разработанных методик получены составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй марок по удобоукладываемости Ж1-Ж3 и П1-П5, прочностью при сжатии до 84 МПа, прочностью на растяжение при изгибе до 7,5 МПа, морозостойкостью 600 циклов и водонепроницаемостью $18 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$ (таблица 5.7.1).

Достоверность полученных результатов и разработанных зависимостей для подбора составов и прогнозирования свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй подтверждена достаточным объемом экспериментальных данных, испытаниями контрольных образцов по стандартным методикам и апробацией на производстве.

Составы модифицированных мелкозернистых бетонов и фибробетонов

№ п/п	Ц, кг/м ³	МК, кг/м ³	П, кг/м ³	Ф _{шп} , кг/м ³	ГП. % МКВ	В _{общ} , дм ³	В В	ρ _{см} , кг/м ³	R _{fb} , МПа	R _{ftb} , МПа	F, цикл	W, МПа*10 ⁻¹	Ц, руб.
Жесткие смеси (Ж=30-60 сек)													
1	620,9	-	1692,4	-	0,04	155,1	0,25	2468,5	34,98	3,82	260	5	3007,67
2	466,9	-	1783,2	1	0,25	168,4	0,361	2420,7	29,45	4,52	250	5	2997,27
3	472,1	-	1803,1	0,9	0,2	159,4	0,338	2436,5	27,83	4,06	255	5	2910,52
4	651,7	-	1672,1	-	0,08	152,6	0,234	2477,1	36,85	5,12	265	6	3128,34
5	579,5	-	1694,1	0,5	0,1	166,9	0,288	2441,7	38,32	5,08	265	6	3023,32
6	578,9	-	1692,5	0,9	0,1	166,7	0,288	2441,2	36,72	5,27	270	6	3111,65
Жесткие смеси (Ж=10-30 сек)													
7	527,7	-	1583,0	-	-	227,0	0,43	2337,7	43,1	4,65	400	8	2486,85
8	471,4	41,0	1537,2	-	-	243,9	0,476	2293,6	35,7	4,01	530	16	2759,66
9	430,5	70,1	1501,9	-	-	257	0,514	2259,8	31,4	3,68	480	15	2948,89
10	527,1	-	1581,2	1,0	-	226,7	0,43	2336,0	41,3	4,79	460	13	2674,03
11	526,5	-	1579,6	2,0	-	226,4	0,43	2334,5	39,1	4,95	430	14	2861,27
12	525,9	-	1577,9	3,0	-	226,0	0,43	2333,1	38,2	5,09	350	10	3048,48
13	515,9	44,9	1682,4	-	0,25	171,5	0,306	2416,1	75,4	6,63	535	16	3186,93
14	528,5	45,9	1723,4	-	0,5	150,3	0,262	2451,1	74,4	6,57	505	15	3435,4
15	533,9	46,4	1740,8	-	0,75	140,7	0,243	2466,2	73,4	6,51	475	15	3644,65
16	515,3	44,8	1680,3	1,1	0,25	171,3	0,306	2414,3	71,8	6,41	600	18	3364,19
17	526,7	45,8	1717,5	2,3	0,25	151,7	0,265	2445,5	69,2	6,28	510	18	3632,12
18	527,2	45,8	1719,1	2,3	0,5	149,9	0,262	2447,2	83,6	7,09	590	18	3806,61
19	531,8	46,3	1734,2	3,5	0,75	140,2	0,243	2460,2	77,5	6,75	440	15	4208,37
20	566,0	-	1689,0	1,1	0,25	168,6	0,298	2435,1	55,9	5,43	470	16	3024,25
21	552,8	-	1658,4	2,2	0,25	186,7	0,338	2401,6	48,7	5,58	400	16	3133,17
22	552,1	-	1656,4	3,3	0,25	186,5	0,338	2399,7	46,6	5,64	470	14	3311,15

23	428,1	-	1712,5	-	-	209,8	0,49	2350,4	31,3	3,68	300	6	2175,60
Малоподвижные смеси П1 (ОК=1-4см)													
24	542,8	-	1628,4	1,1	0,5	201,7	0,372	2376,7	51,8	5,23	460	14	3064,54
25	396,4	55,2	1662,7	2,2	0,5	217,3	0,512	2310,8	42,3	4,84	480	15	3366,86
26	462,4	40,2	1507,9	1,5	-	256,8	0,511	2268,7	35,7	4,2	520	16	2954,34
27	504,2	43,8	1644,3	1,1	0,25	189,1	0,345	2383,9	57,7	5,71	550	16	3295,50
28	504,6	43,9	1645,6	2,0	0,5	186,5	0,34	2385,3	58,7	5,91	510	15	3611,79
Подвижные смеси П3 (ОК=10-15 см)													
29	472,1	64,4	1609,5	1,0	0,25	203,5	0,379	2351,8	51,6	5,29	600	12	3394,68
30	470,5	52,3	1568,2	1,0	0,25	225,2	0,431	2318,5	44,2	4,79	580	12	3225,07
31	480,6	53,4	1601,9	2,1	0,5	206,5	0,387	2347,2	54,6	5,34	500	12	3633,72
32	531,4	-	1594,3	1,0	0,5	218,4	0,411	2347,9	46,9	4,97	435	10	2988,29
33	529,7	-	1589,1	3,1	0,75	217,7	0,411	2343,7	46,8	5,13	350	8	3323,31
Подвижные смеси П4 (ОК=16-20 см)													
34	434,9	37,8	1418,1	-	-	302,5	0,64	2193,3	32,6	3,79	370	8	2547,22
35	483,6	42,0	1577,1	2,1	0,75	219,2	0,417	2328,0	46,0	5,05	410	8	3650,46
36	464,8	63,1	1584,7	1,5	0,25	215,1	0,407	2330,9	47,9	5,06	380	6	3428,76
37	464,1	63,3	1582,2	2,1	0,5	214,9	0,407	2329,2	47,3	5,17	450	10	3679,7
38	506,2	-	1650,6	1,0	0,75	204,3	0,404	2365,9	47,9	5,04	405	9	3054,72
Литые смеси П5 (ОК=21-25 см)													
39	468,2	40,6	1526,8	1,0	0,25	246,4	0,485	2282,7	38,1	4,36	330	7	3058,85
40	472,4	52,4	1574,8	2,1	0,5	219,9	0,419	2322,6	42,9	4,55	350	9	3576,65
41	468,1	51,9	1560,5	1,5	0,75	226,6	0,436	2311,8	43,6	4,82	370	10	3603,05
42	429,4	37,3	1400,2	-	0,5	309,6	0,663	2178,9	25,2	3,19	270	6	2795,39

Выводы по 5-й главе:

1. Установлено, что использование микрокремнезема в составе многокомпонентного вяжущего без предварительной активации эффективно в пределах $8 \div 10$ % от общей массы вяжущего, при этом фактическая активность вяжущего составила $R_{\text{МКВ}} = 58,4 \div 57,2$ МПа, что всего на 4 - 5 % меньше активности цемента.

2. Доказана возможность и предложены способы значительного повышения прочности и трещиностойкости фибробетона за счет термической обработки фибры, при которой удаляется замасливатель, влияющий на качество контактной зоны, и происходит деформирование волокон, улучшающее их анкеруемость в цементном камне.

3. Построены математические модели плотности и прочности при сжатии и на растяжении при изгибе обычного и модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй в возрасте 28 суток при разных П/Ц и с учетом структурных характеристик C и W .

4. Исследовано совместное влияние модификаторов структуры на морозостойкость и водонепроницаемость мелкозернистого бетона и получены зависимости для прогнозирования эксплуатационных характеристик ММФБ. При изучении взаимодействий микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры установлено их оптимальное соотношение $1:0,062:0,05$ по массе для достижения максимальных показателей прочности и $1:0,133:0,025$ по массе для достижения максимальных показателей морозостойкости и водонепроницаемости.

5. Разработаны методики и алгоритм расчета состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй с требуемыми свойствами при помощи математических моделей структурных, прочностных и эксплуатационных характеристик. С их помощью разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй марок по удобоукладываемости Ж1-Ж3 и П1-П5, прочностью при сжатии до 84

МПа, прочностью на растяжение при изгибе до 7,5 МПа, морозостойкостью 600 циклов и водонепроницаемостью $18 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$.

7. Долгосрочные испытания образцов, выдержанных 3 года в уличных условиях, позволили установить сохранность полипропиленовых волокон и отсутствие внешних дефектов. Прочность при сжатии образцов (с расходом МК = 8 %; ГП = 0,25 % от МКВ; $\Phi_{\text{ПП}} = 1 \text{ кг/м}^3$ ($\mu_v = 0,11 \%$)) возросла на 18 % за первый год твердения, на 32 % - за два года и на 44 % за три года твердения.

8. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования подтверждают рабочую гипотезу о том, что взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и низко модульной полипропиленовой фибры в оптимальных дозировках позволяет увеличить седиментационную устойчивость цементной системы, регулировать технологические свойства смеси и значительно повысить прочностные, деформационные и эксплуатационные показатели качества мелкозернистого бетона за счет формирования более плотной и слитной структуры полиморфными модификациями оксида кремния и новообразованиями.

Глава 6. Опытнo - промышленное внедрение результатов исследования

6.1 Опытнo - промышленное испытание и внедрение технологии модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй

Результаты теоретических и лабораторных исследований были приняты за основу при проведении опытнo – промышленных испытаний и внедрения технологии модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй. На основании проведенных экспериментов разработаны «Рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных конструкций».

Разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй для вибропрессованных дорожных изделий (тротуарная плитка и бортовой камень) и осуществлено их внедрение на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома) при изготовлении тротуарной плитки в объеме 200 м² и бордюрных камней в количестве 780 шт.

По результатам комплексных испытаний изделий и прочностных и эксплуатационных свойств фибробетонов выполнен отчет о научно – практической работе «Исследование свойств и испытание дорожных изделий и конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй» для ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома).

Для совершенствования технологии и повышения качества бортовых камней и тротуарной плитки разработан Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий для ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома).

При изготовлении вибропрессованных изделий из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй отсутствовала необходимость перестраивать и перенастраивать оборудование. Приготовление смеси и формование изделий велись по отработанной технологии, при этом для

введения полипропиленовой фибры не потребовались специальные приспособления и устройства, и она засыпалась вручную непосредственно в смеситель, что также влияло на экономическую составляющую себестоимости производства фибробетонных изделий.

Технология приготовления фибробетонных смесей и производства вибропрессованных изделий состоит из следующих операций:

- загрузка подающего бункера песком (естественной влажности) и засыпка его в смеситель принудительного действия;
- дозирование и засыпка цемента в смеситель принудительного действия;
- перемешивание песка и цемента в течение 1,5 – 2 мин и добавление полипропиленовой фибры;
- постепенная подача воды с растворенной в ней добавкой и перемешивание смеси в течение 1,5 – 3 мин;
- контроль влажности смеси и однородности распределения фибры в ней;
- подача 1/3 объема приготовленной модифицированной мелкозернистой фибробетонной смеси по ленте транспортеру в приемный бункер вибропресса;
- управление подачей смеси в матрицу – пуансон и виброштампование изделий производится под контролем оператора с пульта ручного управления;
- поддоны с изготовленными изделиями подаются транспортером, оборудованным электродвигателем, к устройству складирования и штабелирования;
- производится операционный контроль качества изделий (визуальный осмотр, геометрические измерения, отбраковка изделий);
- при достижении определенной высоты штабеля (для тротуарной плитки – 8-9 поддонов, для бортовых камней – 3 – 4 поддона) погрузчик – штабелер отвозит их на временное размещение на склад готовой продукции;
- процесс повторяется, пока не израсходуется смесь в смесителе;
- в конце смены оборудование очищается и смазывается.

Схема технологической линии для приготовления модифицированной мелкозернистой фибробетонной смеси и производства дорожных изделий представлена на рисунке 6.1.1

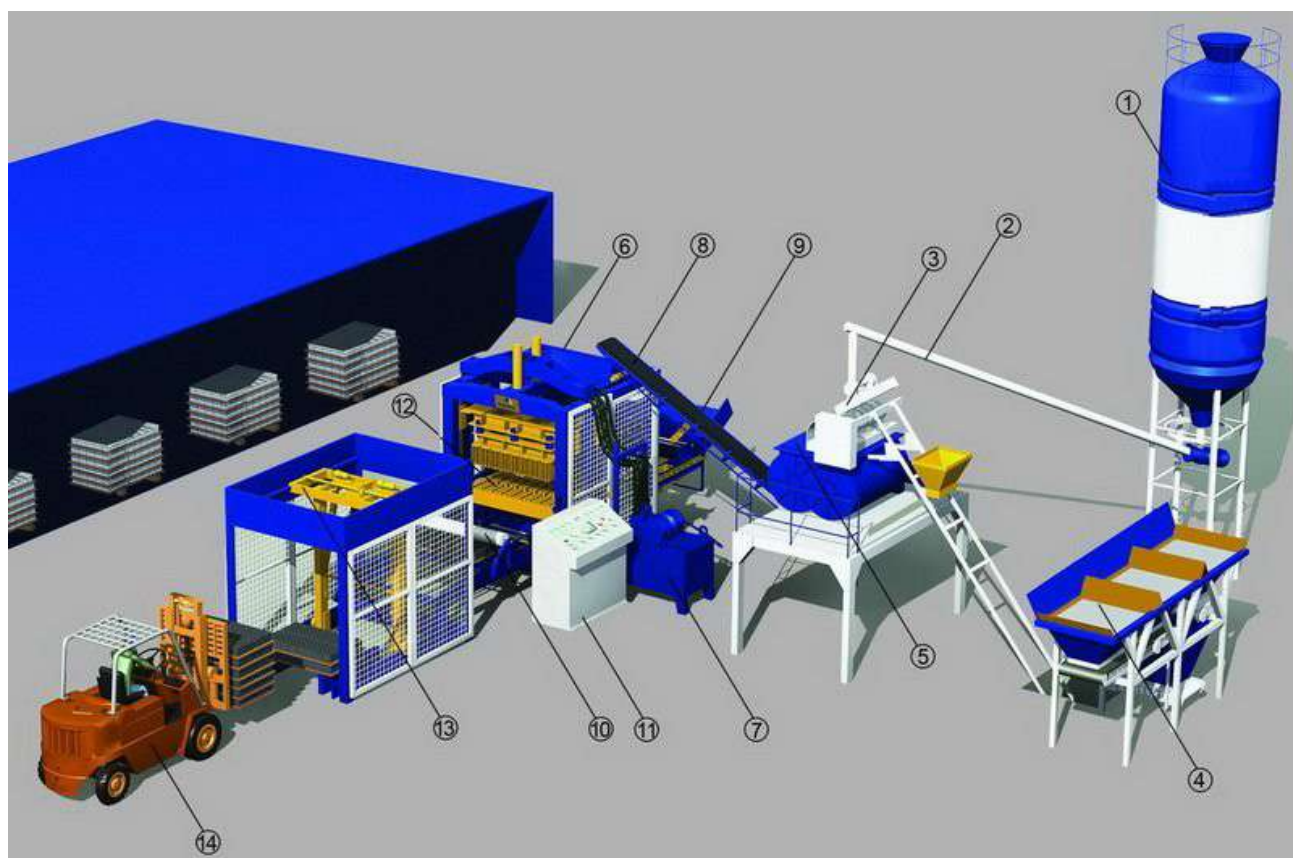


Рис. 6.1.1. Схема технологической линии для производства дорожных изделий.

1. Силос для цемента; 2. Шнек подачи цемента; 3. Дозатор цемента, воды и химической добавки; 4. Бункер для песка с транспортером и дозатором; 5. Смеситель принудительного действия (фибра загружается через верхнюю крышку); 6. Раздаточный бункер для мелкозернистой фибробетонной смеси; 7. Гидравлический насос; 8. Лента – транспортер подачи смеси; 9. Вибропресс с приемным бункером для готовой смеси; 10. Электродвигатели и транспортеры подачи поддонов с виброштампованными изделиями; 11. Пульт ручного управления; 12. Матрица – пуансон и вибростол; 13. Устройство для складирования и штабелирования поддонов; 14. Погрузчик – штабелер; 15. Временный склад для набора прочности готовых изделий и конструкций.

6.2 Разработка и обоснование положений изобретения – состав фибробетона

Использование полипропиленовой фибры в высокопрочных модифицированных мелкозернистых бетонах является новизной, поэтому по результатам исследований и испытаний экспериментальных составов можно судить об их изобретательском уровне и промышленной применимости. На основании этого разработаны положения и составлен комплект документов в соответствии с требованиями ФИПС на изобретение – состав фибробетона.

C04B

СОСТАВ ФИБРОБЕТОНА

Изобретение относится к составу фибробетона, применяемого для изготовления сборных и монолитных строительных конструкций и изделий с высокими эксплуатационными характеристиками.

Известна фибробетонная смесь, включающая цемент, заполнитель и упрочнитель – стальную проволоку [Пат. №2420472. Российская Федерация. Фибробетонная смесь / Перфилов В.А.; патентообладатель Перфилов В.А. – Оpubл. 10.06.2011. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>]. Недостатками смеси являются применение специального оборудования и затраты времени для приготовления модифицирующей добавки, применение щебня двух фракций.

Наиболее близким является состав фибробетонной смеси, содержащей портландцемент, базальтовое волокно, пластификатор, песок и воду [Пат. №2423331. Российская Федерация. Фибробетонная смесь / Боровских И.В., Хозин В.Г., Морозов Н.М.; патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Фибробетонные люки" (ООО "ФБЛ"). - Оpubл. 10.07.2011. – Режим доступа: <http://www1.fips.ru>], принятый за прототип.

Основными недостатками смеси являются применение дорогостоящего фракционированного песка, высокий расход цемента и базальтового волокна, отсутствие данных по водонепроницаемости, применяемые пластификаторы имеют разные технические свойства.

Технической задачей заявленного изобретения является получение фибробетона с высокой прочностью при сжатии, морозостойкостью и водонепроницаемостью при минимальном расходе цемента, а также снижение себестоимости состава в целом.

Технический результат достигается тем, что рациональный подбор и расход компонентов фибробетонной смеси обеспечивают повышение прочности при сжатии, увеличение морозостойкости и водонепроницаемости фибробетона, а снижение количества цемента и использование крупного нефракционированного песка ведет к уменьшению его себестоимости.

В таблице 6.2.1 приведена информация, подтверждающая положительный эффект заявленного изобретения.

Таблица 6.2.1

ФИБРОБЕТОННАЯ СМЕСЬ

Наименование	Содержание компонентов в составе, мас.%						
	Рациональные составы						Прототип
	1	2	3	4	5	6	
Портланд-цемент	21,30	21,50	21,60	20,30	20,50	19,80	30,00
Микрокремнезем	1,86	1,80	1,88	2,30	2,27	2,70	3,50
Пластификатор	0,19	0,39	0,59	0,18	0,38	0,56	0,60
Полипропиленовое волокно	0,04	0,09	0,14	0,05	0,14	0,13	1,50 (базальт)
Песок	69,60	70,24	70,50	67,60	68,20	67,50	55,00
Вода	7,01	5,98	5,29	9,57	8,51	9,31	9,40
Прочность при сжатии, МПа	71,80	83,60	81,20	50,50	54,60	41,50	95,00
Морозостойкость, циклы	F600	F600	F500	F600	F500	F300	F 360
Водонепроницаемость, МПа*10 ⁻¹	W16	W14	W14	W16	W14	W10	-
Осадка конуса, см	0	0	0	12	15	23	15

Заявленная фибробетонная смесь содержит портландцемент, микрокремнезем, пластификатор, волокнистый наполнитель, песок и воду. В качестве пластификатора использован гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, волокнистого наполнителя – полипропиленовое волокно длиной 18 мм и диаметром 20 мкм, песок крупный с модулем крупности $M_k=2,5\div 3,0$ вводится в смесь в нефракционированном виде. Соотношение компонентов в фибробетонной смеси выбрано следующим, мас. %:

Портландцемент	19,00-22,00
Микрокремнезем	1,50-2,50
Пластификатор	0,15-0,60
Полипропиленовое волокно	0,02-0,15
Песок	65,00-75,00
Вода	остальное.

Для приготовления фибробетонной смеси применялись:

- портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ЗАО «Белгородский цемент», ГОСТ 31108-2003, ГОСТ 30515-97;

- микрокремнезем МКУ-85 ОАО «Кузнецкие ферросплавы», г. Новокузнецк, ТУ 5743-048-02495332-96 со следующим химическим составом, мас. %: SiO_2 93,8; H_2O 0,1; Na_2O 0,68; K_2O 1,6; CaO 0,41; SiO_3 0,41; потери при прокаливании 1,6;

- гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, EN 934-2:2001, ГОСТ 24211-2008 – жидкая добавка на основе поликарбоксилатов и замедлителя производства «STACHEMA Bratislava a.s.», Bratislava, Slovak Republic;

- полипропиленовое волокно длиной 18 мм и диаметром 20 мкм, ТУ 2272-001-90345062- 2012, ТУ 5458-001-82255741-2008;

- песок нефракционированный крупный $M_k = 2,5\div 3,0$, ГОСТ 8736 – 93.

При применении микрокремнезема в составе вяжущего и крупного нефракционированного песка увеличивается плотность смеси, повышается прочность и снижается пористость цементного камня и уменьшается расход цемента. Гиперпластификатор позволяет увеличить водоредуцирующий эффект,

улучшить реологические и технологические свойства смеси. Наибольшее влияние при равномерном распределении по объему полипропиленовое волокно оказывает на бетонную матрицу в качестве усиления контактной зоны «цементный камень – заполнитель». Оптимизация расхода компонентов в составе фибробетонной смеси позволяет получать фибробетоны с высокими эксплуатационными показателями качества.

Фибробетонную смесь готовили следующим образом: портландцемент предварительно смешивали с микрокремнеземом, затем засыпали вяжущее вместе с песком в лопастной бетоносмеситель и перемешивали в течение 30 с до получения однородной массы. После этого в сухую смесь до получения требуемой подвижности добавляли воду с растворенным в ней пластификатором и перемешивали в течение 60 с. Затем полипропиленовое волокно добавляли без предварительной подготовки в готовую смесь и перемешивали еще 60 с. Уплотнение смеси проводилось на лабораторном вибростоле. Твердение фибробетонной смеси проходило в нормальных условиях; испытание фибробетонных образцов на прочность при сжатии, морозостойкость и водонепроницаемость производилось на 28-е сутки в соответствии с ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10060-2012, ГОСТ 12730.5-84.

Предложенные рациональные составы фибробетонных смесей, а также прочностные и эксплуатационные свойства полученных фибробетонов в сравнении с прототипом показаны на фиг. 1. При использовании нефракционированного крупного песка с модулем крупности $M_k=2,5\div 3,0$, при малых расходах полипропиленового волокна 0,02-0,15% и дозировках пластификатора 0,15-0,60% достигается высокая прочность фибробетона при сжатии, увеличивается его морозостойкость и водонепроницаемость. При увеличении подвижности (до ОК=23 см) фибробетонной смеси показатели качества изменяются незначительно.

Сопоставление результатов испытаний заявленного решения (оптимальные составы фибробетонной смеси 1-3) и прототипа показывает, что прочность при сжатии меньше на 12%, морозостойкость выше в 1,7 раза при экономии цемента

и микрокремнезема в 1,5 раза и уменьшении расхода волокна от 10 до 30 раз по массе.

ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ

Фибробетонная смесь, содержащая портландцемент, микрокремнезем, пластификатор, волокнистый наполнитель, песок и воду, отличающаяся тем, что содержит в качестве пластификатора гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, в качестве волокнистого наполнителя полипропиленовое волокно длиной 18 мм и диаметром 20 мкм, песок крупный с модулем крупности $M_K=2,5\div 3,0$ в нефракционированном виде при следующем соотношении компонентов, мас. %:

Портландцемент	19,00-22,00
Микрокремнезем	1,50-2,50
Пластификатор	0,15-0,60
Полипропиленовое волокно	0,02-0,15
Песок	65,00-75,00
Вода	остальное.

РЕФЕРАТ

(к заявке на изобретение)

ФИБРОБЕТОННАЯ СМЕСЬ

Изобретение относится к составу фибробетона, применяемого для изготовления сборных и монолитных строительных конструкций и изделий с высокими эксплуатационными характеристиками.

Технической задачей заявленного изобретения является получение фибробетона с высокой прочностью при сжатии, морозостойкостью и водонепроницаемостью при минимальном расходе цемента, а также снижение себестоимости состава в целом.

Технический результат достигается тем, что рациональный подбор и расход компонентов фибробетонной смеси обеспечивают повышение прочности при сжатии, увеличение морозостойкости и водонепроницаемости фибробетона, а снижение количества цемента и использование крупного нефракционированного

песка ведет к уменьшению его себестоимости.

6.3 Экологические аспекты производства полипропиленовой фибры и применения в строительстве

Производство синтетических волокон развивается более быстрыми темпами, чем производство искусственных волокон. Это объясняется доступностью исходного сырья и разнообразием свойств исходных полимеров, что позволяет получать синтетические волокна с различными свойствами.

В качестве исходного сырья для получения синтетических волокон используют продукты переработки газа, нефти и каменного угля (бензол, фенол, этилен, ацетилен и т.д.). Вид полученного полимера зависит от вида исходных веществ, следовательно, необходимо исследовать санитарно – гигиенические и экологические характеристики материалов.

Полипропиленовые волокна формируются из расплава изотактического полипропилена методом экструзии при температуре на 20-30 °С ниже температуры плавления полимера.

Процесс производства и переработки волокон сопровождается образованием твердых и жидких отходов производства и потребления, выбросами загрязняющих веществ в атмосферу, сбросом сточных вод в систему канализации. Кроме того, на окружающую среду и организм человека воздействуют вредные вещества в виде пыли полимера, неорганической пыли, паров и аэрозолей компонентов замасливателей, серной кислоты и химических составов для обработки волокон, газов от сушильных камер и печей для термохимической обработки.

В условиях нормальной эксплуатации полипропилен устойчив к воздействию высоких температур ($t_{\text{плав}} = 175 \text{ } ^\circ\text{C}$) и химически инертен, вследствие своей неполярной структуры. полипропилен устойчив к действию химикалий. Поэтому он противостоит воздействию полярных органических растворителей, таких, как спирты, сложные эфиры и кетоны (например, ацетон) и кислоты даже при высокой их концентрации и температуре выше 60 °С. Также

полипропилен устойчив к воздействию водных растворов неорганических соединений - солей, кипящей воды и щелочей.

Однако, при нагревании свыше 200 °С и при воздействии ультрафиолетовых лучей происходит деструкция полипропилена и выделяются продукты разложения: органические кислоты, эфиры, непредельные углеводороды, перекисные соединения и ацетальдегид.

Мигрирующие химические вещества - низкомолекулярные соединения, механизм действия которых на иммунную систему организма недостаточно выяснен. В больших количествах они приводят к болезням дыхательных путей и глаз, аллергическим реакциям, поражению внутренних органов и кожных покровов.

Результаты проведенной санитарно – эпидемиологической экспертизы полипропиленовой фибры показывает безопасность ее применения в производстве сухих строительных смесей, бетонов, растворов и изделий для промышленного, сельскохозяйственного и гражданского строительства. Фактические показатели миграции вредных веществ в воздух и воду представлены в таблице 6.3.1

Таблица 6.3.1

Гигиеническая характеристика полипропиленовой фибры

Химические вещества	Гигиенический норматив по ГН 2.1.6.1338-03	Фактическое содержание химических веществ
Миграция химических веществ в воздух, (мг/м ³)/ в воду, (мг/дм ³)		
бензол	0,1 / 0,01	величина ПДК в пределах допустимой среднесуточной величины
толуол	0,6 / 0,5	
формальдегид	0,003 / 0,05	
циклогексанон	0,04 / 0,2	
ксилолы (сумма изомеров)	0,2 / 0,2	
фенол	0,003 / 0,001	
гексен	0,085 / -	
этилбензол	0,02 / 0,01	
ацетальдегид	0,001 / -	

Таким образом, полипропиленовая фибра считается относительно безопасным материалом. Однако она не рассчитана на длительные нагревания до высоких температур. Опасная доза продуктов деструкции полипропилена для человека – около двух часов вдыхания при нагревании до 200 градусов.

Для повышения устойчивости волокон к перепадам температур и УФ облучению в полипропилен вводят различные стабилизаторы. Наряду с соблюдением требований эксплуатации это обеспечит безопасность и долговечность полипропилена.

В условиях производства экологическая безопасность обеспечивается:

- контролем выбросов вредных веществ в атмосферу;
- контролем воздуха в производственных помещениях;
- контролем сточных вод;
- термохимической обработкой оборудования;
- нейтрализацией замасливателей и других химических реагентов;
- использованием вторичного сырья, обезвреживанием и хранением на специальных полигонах.

Проведенные радиологические исследования (приложение 1) подтверждают наличие природных радионуклидов в пределах допустимой нормы. Таким образом, разработанные составы модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй могут быть применены в дорожных, мостовых, гидротехнических и военных сооружениях и конструкциях, ремонтных и инъекционных смесях, в изделиях и конструкциях, работающих в агрессивных средах и в суровых климатических условиях, а также в гражданском и сельскохозяйственном строительстве.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Произведен рентгенофазовый анализ и получены дифрактограммы цементного камня обычного и модифицированного вяжущего. Определены их минералогические составы и доказано формирование более слитной и однородной структуры композита за счет новообразований.

2. Исследованы механизмы и разработана схема взаимодействия микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры при формировании структуры и процессах твердения цементного камня и установлено их влияние на технологические, прочностные, деформационные и эксплуатационные свойства мелкозернистых бетонов.

3. Теоретически обоснована и экспериментально доказана возможность значительного повышения прочности и трещиностойкости фибробетона за счет термической обработки фибры, способствующей деформированию волокон, ускорению гидролиза и экстракции аппретов с их поверхности. Применение термообработанной полипропиленовой фибры позволило повысить прочность фибробетона при сжатии до 12 %, на растяжение при изгибе – до 10 %.

4. При исследованиях вязкости разрушения выявлено, что фактический прогиб до разрушения образцов-балочек из мелкозернистого фибробетона оказался выше контрольного в 1,85 раза, значения трещиностойкости мелкозернистого фибробетона увеличились в 1,9 раза по сравнению с контрольным составом, при коэффициенте армирования $\mu_v = 0,33$ % ($F_{III} = 3$ кг/м³) сопротивление разрушающей нагрузке возрастает до 90 %.

5. Разработаны многофакторные математические модели расчета и прогнозирования технологических, прочностных и эксплуатационных свойств модифицированного мелкозернистого фибробетона при разных П/Ц и с учетом структурных характеристик C и W .

6. Изучены термические и усадочные деформации ММФБ в условиях квазистатической сушки. На основании исследований температурного расширения материалов доказано, что на усадку влияют условия твердения, водовязущие отношения составов и теплофизические свойства компонентов

смеси. Модифицированные составы имеют минимальные значения «расширения - усадки» в диапазоне температур от $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+90\text{ }^{\circ}\text{C}$, что подтверждается результатами исследований коэффициентов линейной температурной деформации композитов.

7. Исследовано совместное влияние модификаторов структуры на прочность, морозостойкость и водонепроницаемость мелкозернистого бетона и получены зависимости для расчета и прогнозирования эксплуатационных характеристик ММФБ. Установлено, что взаимодействие микрокремнезема, гиперпластификатора и полипропиленовой фибры позволяет увеличить прочность мелкозернистого бетона в 1,5 - 2 раза, морозостойкость в 1,5 раза, водонепроницаемость - в 2,2 раза. Оптимальное соотношение модифицирующих компонентов для достижения максимальных показателей прочности составляет 1:0,062:0,05 по массе, для показателей морозостойкости и водонепроницаемости - 1:0,133:0,025 по массе.

8. Разработаны методики и алгоритм расчета состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй с заданными свойствами при помощи математических моделей структурных, прочностных и эксплуатационных характеристик. С их помощью получены составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй марок по удобоукладываемости Ж1-Ж3 и П1-П5, прочностью при сжатии до 84 МПа, прочностью на растяжение при изгибе до 7,5 МПа, морозостойкостью 600 циклов и водонепроницаемостью $18\text{ МПа}\cdot 10^{-1}$.

9. Долгосрочные испытания образцов, выдержанных 3 года в уличных условиях, позволили установить сохранность полипропиленовых волокон и отсутствие внешних дефектов. Прочность при сжатии образцов (при расходе МК = 8 %; ГП = 0,25 %; $\Phi_{\text{ПП}} = 1\text{ кг/м}^3$ ($\mu_v = 0,11\text{ \%}$)) возросла на 18 % за первый год твердения, на 32 % - за два года и на 44 % за три года твердения.

10. Произведены радиологические исследования модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй спектрометрическим методом и установлено соответствие полученных данных санитарно-

эпидемиологическим и гигиеническим требованиям к строительным материалам.

11. Разработаны «Рекомендации по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных изделий и конструкций».

12. Разработан «Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий» для ОАО «Костромской силикатный завод».

13. Осуществлено внедрение результатов исследований на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» (г. Кострома) при изготовлении тротуарной плитки в объеме 200 м² и бордюрных камней в количестве 780 шт.

Экономический эффект в ценах на 30 сентября 2015 года от внедрения результатов научных исследований составил – 97,15 рублей на 1 м³ бетона для производства тротуарной плитки и 105,02 рубля на 1 м³ бетона для производства бордюрных камней за счет снижения расхода цемента и энергозатрат.

14. Для оценки эксплуатационных показателей качества произведены испытания готовой продукции, результаты которых отражены в научно – практической работе «Исследование свойств и испытание дорожных изделий и конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй».

Перспективы дальнейшей разработки темы. Рациональным являются исследование разных видов замасливателей, химических процессов, протекающих при их гидролизе, и оценка их воздействия на качество контактной зоны «цементный камень-волокно». Для улучшения адгезии и анкеруемости в цементном камне особый интерес могут представлять исследования способов и разработка технологии химической обработки волокон. Разработка методик оценки технико – экономической эффективности применения модифицированных фибробетонов и долговечности конструкций из них позволять решить вопросы ресурсосбережения и межремонтного ресурса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ВСН 171-70 Технические указания по применению мелкозернистых (песчаных) цементных бетонов в дорожном строительстве. / Минтрансстрой. - М.: 1971. – п. 2.5.
2. Батраков В. Г., Модифицированные бетоны. Теория и практика.-2-е изд., перераб. и доп. – М.: 1998. – 768 с.
3. Баженов Ю. М. Способы определения состава бетона различных видов / М.: Стройиздат, 1975. 236 с.
4. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Газизулин В.М., Воронов Ю.И. Эффективный путь утилизации ультрадисперсных продуктов газоочистки печей //Сталь. -1992. - №5. - С. 83-85.
5. Ахвердов И.Н. основы физики бетона / М.: Стройиздат, 1981. – 464 с.
6. Трофимов Б. Я., Горбунов Л. Я., Крамар Л. Я. Использование отхода производства ферросилиция //Бетон и железобетон. -1987. - №4. - С. 39-41.
7. Русина, В.В. Минеральные вяжущие вещества на основе многотоннажных промышленных отходов: учебное пособие. – Братск: ГОУ ВПО «БрГУ», 2007. – 224 с.
8. ГОСТ Р 56178-2014 Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия / М.: Стандартиформ., 2015. - 23 с.
9. ТУ 5743 – 048 – 02495332 – 96 Микрокремнезем конденсированный. / НИИЖБ. - М., 1996.
10. Лохова Н.А., Макарова И.А., Патраманская С.В. Обжиговые материалы на основе микрокремнезема. - Братск: БрГТУ, 2002. – 163 с., ил.
11. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Влияние составов материалов на формирование свойств строительных композитов / Вестник СиБАДИ – 2015, № 4(44). С. 69-79.
12. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. / М.: Стройиздат, 1971. 208 с.

13. Горчаков Г.И. Строительные материалы. Учебник для студентов вузов. - М.: Высш. школа, 1981. - 412 с.
14. Тейлор Х. Химия цемента. Пер. с англ. – М.: Мир, 1996.
15. Черкасов Г.И. Введение в технологию бетона Иркутск: Восточно-Сибирское книжное издательство, 1974. - 312 с.
16. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. –343 с.
17. Лесовик В.С., Чулкова И.Л. Управление структурообразованием строительных композитов / Сибир. гос. авт.-дор. акад. – Омск, 2011. – 459 с.
18. Фаликман В.Р., Соболев К.Г. Нанотехнологии приведут к созданию нового поколения бетонов. / Строительство: новые технологии – новое оборудование. // М.: № 4., 2011.
19. Антонович В. Исследование возможности применения микрокремнезема низкого качества в среднецементном жаростойком бетоне с дефлокулянтом Castament FS 20 / Новые огнеупоры. - 2007. -№ 9.- с. 53-57.
20. Гоберис С. Кинетические особенности алюминатного цемента Gorkal-40 в суспензиях с микрокремнеземом и полифосфатом натрия. / С. Гоберис, И. Пундене, Э. Спудулис//Цемент и его применение -2002.-№4. – С. 21-23.
21. Антонович В. Влияние качества микрокремнезема на реологию цементного теста и характеристики низкоцементного жаростойкого бетона на шамотном заполнителе. / Новые огнеупоры. - 2007. - №5.-с. 41- 46.
22. Парр К. Алюминаткальциевые цементы для бетонов с пониженным содержанием цемента./ Новые огнеупоры. -2006. -№ 4. -с. 135-141.
23. P.C. Aitcin, S.L. Sarkar, M.Regourd, H. Norman. Microstructure of a two - year -old very high strength field concrete (100 Mpa), Utilization of High Strength Concrete. Prodeedings, Simposium in Stavanger, June 1987, p.p. 99-109.
24. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Микрокремнезем в бетоне./ Обзорная информация. – М.: ВНИИТГПИ, 1993.
25. Крамяр Л.Я., Трофимов Б.Я., Талисман Л.С., Иванов Ф.М. Влияние добавки микрокремнезема на гидратацию алита и сульфатостойкость цементного

камня / Цемент. – 1989. - № 6. – С. 14-17.

26. Carles - Giberguest A. Olliver J.P. Grandet J. Evaluation of the “Aureole” of transilition with aging in blendet cement pastes. Proceedings, International Collocvium, Toulouse, France, Nov.– 1989, RJLEM, pp. B.11-B.16.

27. Carles - Giberguest A. Olliver J.P. Hanna B. Ultra fine admixtures in high Strength pastes and mortals / CANMET/ ASI third International Conference on the Fty Ash, Silica fume, Slag and natural pozzolan in concrete. Proceedings. – 1989.-Vol. 2 – P 1101-1117, Trondheim, Norway.

28. Francois de Larrard. Ultrafine partieles for the making of very high strength concretes. Cement and Concrete Research, V.19, № 2, Mar. 1989, pp. 161-172.

29. Feldman R.F., Huang Cheng - yi Properties of Portland cement - silica fume pastes. Porosity and surface properties // Cement and Concrete Research. - 1985. N15. p. 765-774.

30. Батраков В.Г., Силина Е.С., Соболев К.Г. Рекомендации по приготовлению и применению высоко - и сверхвысокопрочных и высокоплотных бетонов с МК./ М.: НИИЖБ, 1992.

31. Батраков В. Г., Каприелов С. С., Пирожников В. В., Применение отходов ферросплавного производства с пониженным содержанием микрокремнезема // Бетон и железобетон. – 1990. - №12 – 15-17 с.

32. Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Коллепарди М. Добавки в бетон: справочное пособие. / М.: Стройиздат, 1988. - 575 с.

33. Khayat K.H., Hwang S-D. Effect of high-range water-reducing admixture type on performance of self-consolidating concrete. SP-239. P. 185 – 200.

34. Koizumi K., Umemura Y., Tsuyuki N. Effect of Chemical Admixtures on the Silicate Structure of Hydrated Portland Cement. Proceeding of the 12th International Congress on the Chemistry of Cement. – Montreal, 2007. P. 64 – 71.

35. Василик П.Г., Голубев И.В., Особенности применения поликарбоксилатных гиперпластификаторов Melflux®./ 15-я междунар. специализ. отраслевая конфер. BaltiMix - "Сухие строительные смеси для XXI века: технологии и бизнес".// СПб., 2003.

36. Фаликман, В.Р. Поликарбоксилатные гиперпластификаторы: вчера, сегодня, завтра / Популярное бетоноведение. № 2 (28), 2009. -С. 86-90.

37. Соболев Г.М., Кузнецова Е.Ф., Комарова А.Ф. Математическое моделирование и планирование эксперимента в технологии бетона. / Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. ст. 65-й междунар. науч.-практ. конф. // Караваево: Костромская ГСХА, 2014. – 224 с.

38. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Структура и свойства бетонов с наномодификаторами на основе техногенных отходов: монография./ ФБОУ ВПО « Моск. Гос. Строит. Ун-т», М.: МГСУ, 2013. – 204 с.

39. Волков И. В., Газин Э.М., Фибробетон. Особенности и перспективы применения в строительных конструкциях. / М.: «СтройПрофиль», 2003. № 2. С. 67-69.

40. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И., Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера: сб. науч. трудов SWorld, матер. междуна. науч.- практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013». – Выпуск 1. Том – Одесса: Куприенко, 2013 – 134 с.

41. Зотов А.Н. Исследование и прогнозирование технологических свойств бетонных смесей с полипропиленовой фиброй. / Вестник гражданских инженеров. / СПбГАСУ. – СПб., 2014. № 1(42) - 224 с.

42. Р 102 – 94 Рекомендации по бетонированию конструкций с помощью автобетононасоса при транспортировке бетонной смеси автобетоносмесителями. / М.: ПКТИ Промстрой, 2004. - 87 с.

43. СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии. (Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85) / М.: 2012. – 94 с.

44. Дулеба М.Т. Синтез и исследование стекол, устойчивых в среде твердеющего портландцемента. / Автореф. дисс. на соиск. канд. техн. наук. // Киев: КПИ. – 1973. – 20 с.

45. Пащенко А.А., Сербин В.П., Армирование цементного камня минеральным волокном. - Киев. – 1973. – 20 с.

46. Рабинович Ф.Н., Клишанис Н.Д. Устойчивость стеклянных волокон к воздействиям среды гидратирующихся цементов. / Неорганические материалы: Изд. Академии наук СССР. – 1982. - № 2. – Т.18. – С. 323 – 329.

47. Васильевская Н.Г., Енджиевская И.Г., Калугин И.Г. Цементные композиции, дисперсно – армированные базальтовой фиброй. / СФУ. Красноярск.: Вестник ТГАСУ. - 2011. - № 3. - С. 153-155.

48. Википедия – свободная энциклопедия: [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Базальт> (Дата обращения: 08.09.2015).

49. Гутников С.И., Лазорьяк Б.И., Селезнев А.Н. Стеклянные волокна. / М.: МГУ. – 2010. – 53 с.

50. Патент РФ № 2031906, 10.07.2001.

51. Патент РФ № 2418752, 20.05.2011.

52. ТУ 5769 – 004 – 80104765 – 2008 Фибра базальтовая. Технические условия. / ООО НПО «Вулкан». - М.: 2008.

53. Стекловолокно [Электронный ресурс]. URL: http://glass-tex.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=149&Itemid=235 (Дата обращения: 09.09.2015).

54. Малова Ю. Г. Физико – химические свойства стекловолокон из алюмосиликатов базальтового состава / Дисс. на соиск. канд. техн. наук. // СПб.: СПбГУ: – 2010. – 143 с.

55. Базальтовая фибра в бетоне [Электронный ресурс]. URL: <http://alliance-ltd.narod.ru/baz.html>, (Дата обращения: 09.09.2015).

56. Hullein, G., Schmieder, F., Sopp, N.: Biegezugfester faserverstärkter Mortel und Beton, LGA-Bericht, Nurnberg, Juli 1987.

57. Полипропилен: [Электронный ресурс]. URL: http://www.ptl.by/documents-processing_plastic_Materials_Polypropylene (Дата обращения: 26.07.2015).

58. Википедия – свободная энциклопедия: [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Полипропилен> (Дата обращения: 23.01.2015).

59. Морозов Н.М., Пухаренко Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / Вестник МГСУ. / МГСУ. – М., 2014. № 3 – С. 189-196.

60. Пухаренко Ю.В., Лезов В.Ю. Оптимизация параметров армирования мелкозернистого бетона синтетическими волокнами // Интенсификация технологических процессов в производстве сборного железобетона: Межвуз. темат. сб. тр. / Л.: ЛИСИ, 1988. -с.24-27.

61. Рабинович Ф.Н. Дисперсноармированные бетоны. М.: Стройиздат, 1989. 177 с.

62. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно – армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография. М.: Издательство АСВ, 2004. - 560 с.

63. A. Kelly. Interface Effects and the Work of Fracture of a Fibrous Composite. Proceedings of the Royal Society of London, Series A 319 95 - 116. - 1970.

64. Barr, B. The fracture characteristics of FRC materials in shear. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105. American Concrete Institute, Detroit, S. 27/53, 1987.

65. Houde J., Prezeau A., Roux R. Creep of concrete containing fibers and silica fume. In: Fiber reinforced concrete, properties and applications. ACI SP-105, American Concrete Institute, Detroit, S. 101/118, 1987.

66. Komlos K., Babal B. Schlagfestigkeit von Faserbeton. TIS -Tiefbau, Ingenieurbau, Strassenbau 34, Heft 4, S. 274/282, 1992.

67. Шкала Мооса (минералогическая шкала твёрдости) : [Электронный ресурс]. URL:<http://uralzsm.ru/Spravochnik/Moosa-shkala-tverdosti> (Дата обращения: 18.02.2015)

68. Эпштейн С.А. Подбор состава бетона и раствора. / Киев.: Госстройиздат, 1959. – 90 с.

69. Баженов Ю.М. Высокопрочный мелкозернистый бетон для армоцементных конструкций / М.: Гостройиздат, 1963. 128 с.

70. Морозов Н.М., Хохряков О.В., Морозова Н.Н., Хозин В.Г. Мелкозернистый бетон для ремонта бетонных оснований нефтедобывающих станций. // Известия КазГАСУ, 2006, № 1 (5). – С. 28-29.

71. Пухаренко Ю.В. Эффективные фиброармированные материалы и изделия для строительства и реставрации: сб. матер. науч.- практ. конф. "Реставрация в храме-памятнике" (Санкт-Петербург, 6-7 декабря 2006 г.). № 2, 2006. СПб, 2006.

72. Рабинович Ф.Н., Романов В.П. О пределе трещиностойкости мелкозернистого бетона, армированного стальными фибрами // Механика композитных материалов, 1985, №2. -с.277-283.

73. Рабинович Ф.Н., Баев С.М. Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 8. С. 28–31.

74. Волокно строительное микроармирующее (фибра): [Электронный ресурс]. URL: <http://www.baumaxima.by/index.pl?act=PRODUCT&id=283> (Дата обращения: 29.02.2015).

75. Полипропиленовые волокна (фибра): [Электронный ресурс]. URL:<http://spb.ettrilat.ru/content/179.html> (Дата обращения: 15.01.2015).

76. Фибра полипропиленовая: [Электронный ресурс]. URL: <http://xtc.com.ua/a43623-fibra-polipropilenovaya.html> (Дата обращения: 14.01.2015).

77. Polypropylene fibres to increase fire resistance of concrete. / Project-related consultation and exchange of jobsite experience: the team of BEKAERT. // Resp. Edit.: /Joof// 06/2004.

78. Петухов Б.В. Полиэфирные волокна. М.: «Химия», 1976. - 272 с.

79. ГОСТ 52581 – 2006 «Ровинг из стеклянных нитей». / М.: Страндартинформ. - 2012.

80. Замасливатели: [Электронный ресурс]. URL: <http://sammas.ru/tehnologii-i-terminologiya/zamaslivateli.html> (Дата обращения: 10.09.2015).

81. Свойства, технические характеристики полипропиленовой фибры: [Электронный ресурс]. URL: <http://alliance-ltd.narod.ru/svoistva.html> (Дата

обращения: 09.09.2015).

82. Силаны: [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Силаны> (Дата обращения: 10.09.2015).

83. Francois de Larrard. A method for Proportsioning Higt – Strength Concrete Mixtures, Cement, Concretes and Aggregates. / CCAGDP. Vol. 12, № 2, Summer 1990, p.p. 47-52.

84. Tsukamoto, M. Untersuchung zur Durchlassigkeit von faserfreien und faserverstärkten Bauteilen mit Trennrissen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 440, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1994.

85. Sellevold E.J., Boger D.H., Jenser E. Silica Pume Cement Pastes: hydration and pore structure // Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1982, Report BML 82610, p. 19–50.

86. ГОСТ 30459 – 96 Добавки для бетонов. Методы определения эффективности. / М., 1997. – п. 7.1.4.1.

87. Соболев Г.М., Зотов А.Н. Исследование свойств модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй // Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. ст. 66-й междунар. науч.-практ. конф. Караваево: Костромская ГСХА, 2015. – 220 с.

88. Соболев Г.М., Зотов А.Н. Модифицированные фибробетоны с повышенными эксплуатационными характеристиками/ Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии. – Выпуск 82.- Кострома: КГСХА, 2015. – 212 с.

89. Баженов Ю. М. Технология бетона. / М.: Изд-во АСВ, 2002. – 500 с.

90. Малинина Л.А., Королев К.М., Рыбасов В.П. Опыт изготовления изделий из фибробетона в СССР и за рубежом // Обзор ВНИИЭСМ.-М.: 1981. - 35 с.

91. Рабинович Ф.Н. Бетоны, дисперсно армированные волокнами. // Обзор ВНИИЭСМ.-М.: 1976. - 73 с.

92. Способ приготовления фибробетонной смеси / Ф.Н. Рабинович, В.Ф. Исаков, Ю.В. Фролов, В.Н. Астахов, А.М. Берко А.с. 1406134. - 1988.- 2 с.

93. Ларионова З.М., Никитина Л.В., Гарашин В.Р. Фазовый состав, микроструктура и прочность цементного камня и бетона.- М.: Стройиздат, 1977.- 264 стр.

94. Тараканов О.В., Логинов Р.С. Формирование микроструктуры цементных материалов с минеральными и комплексными добавками//Технологии бетонов. - 2009. - №7-8. - с. 58-60

95. Aitcin P.C., Sarkar S.L. Dissolution rate silica fume in very high strength concrete. / Cement and Concrete Research.-Vol. 17, 1987, pp. 591-601.

96. Durekovich A., Popovich K. The influence of silica fume on the mono / di silicate anion ratio during the hydration of CSF – containing cement paste // Cement and Concrete Research.- Vol. 17, 1987, pp. 108-114.

97. Regourd M. Pozzolanic reactivity of condensed silica fume. Booklet on Condensed Silica Fume (Editor.: P.C.Aitkin), Les Press de l'Universite de Sherbrocke, Quebec, pp. 20-24.

98. Дзенис В.В., Лапса В.Х., Ультразвуковой контроль твердеющего бетона.- Л.: Стройиздат, 1971. - 110 с.

99. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности / М.: Стандартинформ., 2014. - 15 с.

100. Traetterberg A. Cemento 75, 259. (1978)

101. Айрапетов Г.А., Несветаев Г.В. Применение расширяющихся цементов для водонепроницаемых конструкций./ «75 лет расширяющемуся цементу». – Веймар, 1995. – с. 161 – 173.

102. Айрапетов Г.А., Панченко А.И., Несветаев Г.В. Морозостойкость напрягающих бетонов после пропаривания // Бетон и железобетон. – 1987. - № 9. – с. 23-24.

103. Ерофеев В.Т., Дергунова А.В. Экономическая эффективность повышения долговечности строительных конструкций // Строительные материалы. – 2008. – № 2. – с. 88-89.

104. Третьяков Ю.Д., Олейников Н.Н., Кеслер Я.А. Химия: Справочные материалы. / Под ред. Третьякова Ю.Д. – 3-е изд. перераб. – М.: Просвещение,

1993. – 287 с.

105. Бабков В.В., Сахибгареев Р.Р., Чуйкин А.Е. Особенности структурообразования высокопрочного цементного камня в условиях длительного твердения. / Строительные материалы. - № 10, 2003. - С. 42-43.

106. Баженов Ю. М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны./ Научное издание. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2006. – 386 с.

107. Leongardt F., Spannbeton fur die Praxis./ Berlin. 1955., p. 590.

108. Graf O., Die Eigenschaften des Betons. Versuchsergebnisse und Erfahrungen zur Herstellung und Beurteilung des Betons, Springer-Verlag. / Berlin. 1950.

109. DIN 52450:1985-08 Testing of inorganic non-metallic building materials; determination of shrinkage and expansion on small specimens / “Beuth Verlag GmbH”, Berlin.

110. Каприелов С.С, Булгакова М.Г., Вихман Я.Л. Деформативные свойства бетонов с использованием ультрадисперсных отходов Ермаковского завода ферросплавов // Бетон и железобетон. – 1991, № 3. С. 24-25.

111. Невилль А.М. Свойства бетона./ Пер. с англ. В. Д. Парфенова и Т. Ю. Якуб. — М.: Стройиздат, 1972г. — 344с.

112. Цилосани З.Н. Усадка и ползучесть бетона. – Тбилиси: Изд-во «Мецни-ереба», 1979. — 230 с.

113. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1988. – 120 с.

114. Малков М.П., Данилов И.Б., Зельдович А.Г., Фрадков А.Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники./ М.: Энергоатомиздат, 1985.- 432 с.

115. Коэффициент линейного расширения базальтопластика: [Электронный ресурс]. URL:<http://www.naftaros.ru/articles/17/> (Дата обращения: 15.09.2015).

116. Справочник коэффициентов расширения металлов: [Электронный ресурс]. URL: <http://very-stylish.ru/spravochnik-koefficientov-rasshireniya->

metallov.html (Дата обращения: 16.09.2015).

117. Нагорнов А.Г. Трещиностойкость бетонов в связи с их структурой: автореф. дисс. канд. техн. наук. - Тбилиси.: ГГПИ, 1987. – 178 с.

118. Hughes B.P. and Fattuhi N.I., Stress-strain curves for fiber reinforced concrete in compression. *Cement and Concrete Research*. 7 (1977), 173-183.

119. ASTM D696:1998 Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C With a Vitreous Silica Dilatometer. / ASTM International., Pennsylvania, USA.

120. Зотов А.Н. Прочностные свойства мелкозернистых бетонов с модифицированной полипропиленовой фиброй. / *Техника и технологии: роль в развитии современного общества: сб. науч. трудов IV междунар. науч.–практ. конф.* // Априори: Краснодар, 2015. - 132 с.

121. Патент РФ № 2031906, 27.03.1995.

122. Патент РФ № 2140933, 10.11.1999.

123. Абрамов Л.М., Галкина М.А., Скуратович А.В., Чернышева А.А. Особенности деформирования бетона при одноосном сжатии кубических образцов./ *Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе: сб. ст. 65-й междунар. науч.-практ. конф.* // Караваево: КГСХА, 2014. – 224 с.

124. Рабинович Ф.Н. Об уровнях дисперсности армирования бетонов // *Изв. вузов. Строит, и архитект.*, 1981, №11. с.30-36.

125. Зотов А.Н. Оптимизация составов и прогнозирование прочностных свойств модифицированных фибробетонов./ *Отечественная наука в эпоху измерений: постулаты прошлого и теории нового времени: матер. VII междунар. науч.–практ. конф.* // НАУ: Екатеринбург, 2 (7) / 2015. - 169 с.

126. Шумков А.И. Формирование и оптимизация макроструктуры тяжёлого бетона. // *Технологии бетонов*. №7. 2008. с. 52-53.

127. ГОСТ 26996-86 Полипропилен и сополимеры полипропилена. Технические условия / М.: ИПК Издательство стандартов., 2002. - 34 с.

128. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердев Ю.В. Эпоксидные полимеры и композиции./ М.: "Химия", 1982. - 232 с.

129. Справочник химика 21: [Электронный ресурс]. URL: <http://chem21.info/info/915408/> Стеклопластики замасливатели (Дата обращения: 11.10.2015).

130. Андреевская Г.Д. Высокопрочные ориентированные стеклопластики. /М.: Наука, 1966. - 370 с.

131. Ахметов А.С. Молекулярная физика граничного трения. / М.: Физматгич 1973. - 250 с.

132. Королев А.Я., Гаранина С.Л., Жердев Ю.В. - Пласт, массы, № 6. 1967, с. 71-73.

133. Vanderbilt B., Iarazelski f. — Industr. Eng. Chem. Prod. Res. Devel., 1962 vol. 1, N 3, p. 188.

134. История стеклофибробетона [Электронный ресурс]. URL: <http://pandia.ru/text/77/192/23279.php> (Дата обращения: 25.04.2015).

135. ВСН 56-97 Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций. / М.: НИИЖБ, 1997.

ПРИЛОЖЕНИЯ

**ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ
(РОСПАТЕНТ)**

Бережковская наб., 30, корп. 1, Москва, Г-59, ГСП-3, 125993. Телефон (8-499) 240-60-15. Факс (8-495) 531-63-18

На № - от -

Наш № 2014144892/03(072420)

*При переписке просим ссылаться на номер заявки и
сообщить дату получения настоящей корреспонденции
от 04.03.2016*

Зотову Александру Николаевичу
13
дер. Обухово
п/о Курилово
Буйский р-н
Костромская обл.
157011

Р Е Ш Е Н И Е
о выдаче патента на изобретение

(21) Заявка № 2014144892/03(072420)

(22) Дата подачи заявки 06.11.2014

В результате экспертизы заявки на изобретение по существу установлено, что заявленное изобретение относится к объектам патентных прав, соответствует условиям патентоспособности, сущность заявленного изобретения (изобретений) в документах заявки раскрыта с полнотой, достаточной для осуществления изобретения (изобретений)*, в связи с чем принято решение о выдаче патента на изобретение.

Заключение по результатам экспертизы прилагается.

Приложение: на 4 л. в 1 экз.

Заместитель руководителя



Л.Л. Кирий



*Проверка достаточности раскрытия сущности заявленного изобретения проводится по заявкам на изобретения, поданным после 01.10.2014.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЭКСПЕРТИЗЫ

(21) Заявка № 2014144892/03(072420)

(22) Дата подачи заявки 06.11.2014

(24) Дата начала отсчета срока действия патента 06.11.2014

ПРИОРИТЕТ УСТАНОВЛЕН ПО ДАТЕ

(22) подачи заявки 06.11.2014

(72) Автор(ы) Зотов А.Н., RU

(73) Патентообладатель(и) Зотов Александр Николаевич, RU

(54) Название изобретения СОСТАВ ФИБРОБЕТОНА

(см. на обороте)

01	1	ДОМ	11.01.2016	030505
		ИЗФ	11.01.2016	

ВНИМАНИЕ! С целью исключения ошибок просьба проверить сведения, приведенные в заключении, т.к. они без изменения будут внесены в Государственный реестр изобретений Российской Федерации, и незамедлительно сообщить об обнаруженных ошибках.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ
№ 2583965

СОСТАВ ФИБРОБЕТОНА

Патентообладатель(ли): *Зотов Александр Николаевич (RU)*

Автор(ы): *Зотов Александр Николаевич (RU)*

Заявка № 2014144892

Приоритет изобретения 06 ноября 2014 г.

Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 15 апреля 2016 г.

Срок действия патента истекает 06 ноября 2034 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев



ОАО «Костромской силикатный завод»
(предприятие)

Код по ОКПО: 05307720

УТВЕРЖДАЮ



Смирнов М.А. /

М.П.

11 2015 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКОГО МЕРОПРИЯТИЯ № 1

Настоящим актом подтверждаем применение модифицированного мелкозернистого фибробетона, состоящего из цемента, гиперпластификатора Stachement,
(наименование мероприятия, его шифр по плану)
песка, полипропиленовой фибры и воды в производстве тротуарной плитки

выполненных в цехе тротуарной плитки ОАО «Костромской силикатный завод»
(полное наименование предприятия (организации, учреждения), где осуществлено его внедрение)
156604, г. Кострома, ул. Ярославская, 43
цех, участок производства, адрес)

1. Краткое описание и преимущество внедренного мероприятия: применение модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй позволяет снизить энергозатраты, сократить расход цемента, улучшить процесс формовки, повысить качество поверхности, увеличить прочностные и эксплуатационные свойства изделий

2. Дата внедрения июнь – июль 2015 года

3. Основные показатели, характеризующие результаты внедрения мероприятия:

Наименование показателей	№ строки	Ед. изм.	Расчетный период апрель - май	Отчетный период июнь - июль
А	Б	В	1	2
Выпуск продукции (в оптовых ценах предприятия на 30.07.2015)	01	тыс. руб.	126,35	124,99
Число условно высвобожденных работников	11	чел.	-	-
Прирост прибыли (+), уменьшение прибыли (-)	12	тыс. руб.	-	-
Прибыль (+), убыток (-)	13	тыс. руб.	-	-
Экономия от снижения себестоимости продукции (+), удорожание от повышения себестоимости (-)	14	тыс. руб.	-	1,36
Экономический эффект	15	тыс. руб.	-	1,36
Фактические затраты на внедрение, включая затраты прошлых лет	16	тыс. руб.	-	-

4. Социальный, научно-технический, иной положительный эффект, полученный от внедрения:

примененный состав для производства тротуарной плитки обладает ранним набором
(охрана окружающей среды, улучшение и оздоровление условий труда, создание новых рабочих мест,
прочности, позволяет увеличить оборачиваемость опалубочных форм и производительность
совершенствование структуры управления, повышение технического уровня, конкурентоспособности продукции,
оборудования, снизить энергозатраты на производство изделий, обогрев и уход за ними
специальные назначения продукции и т.п.)

Приложение:

Изменение затрат на материалы в результате внедрения научно – технического мероприятия

Главный бухгалтер

М.И. Монархов
(подпись)

Начальник ПТО

Белев Д.Е.
(подпись)

Технический директор

Кисов В.И.
(подпись)

Управляющий ОАО «КСЗ»

Сидоров М.И.
(подпись)

Группа внедрения:

к.т.н. Попов В.М. Попов В.М.

к.т.н. Цыбакин С.В. Цыбакин С.В.

к.т.н. Соболев Г.М. Соболев Г.М.

инж. Зотов А.Н. Зотов А.Н.

Приложение № 1 к акту внедрения
научно – технического мероприятия № 1

Изменение затрат на материалы в результате внедрения научно – технического мероприятия

Наименование материалов	Расход материалов на 1 м ³ , кг		Стоимость материала, руб.	Стоимость на весь объем, руб.	
	Контрольный состав бетона	Модифицированный состав бетона		Контрольный состав бетона	Модифицированный состав бетона
Цемент М500	620,1	466,9	3,6	2232,36	1680,84
Песок (Хромцовского карьера)	1689,9	1783,2	0,368	621,88	656,22
Добавка Stachement 2061/151.2	-	3,89	120	-	466,8
Добавка Murgasan BWA 16	1,67	-	90	150,3	-
Полипропиленовая фибра	-	1	190	-	190
Вода	154,9	168,4	0,02022	3,13	3,41
ИТОГО:				3007,67	2997,27
ИТОГО с затратами на производство:				3549,05	3536,78

Применение модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй позволяет снизить стоимость 1 м³ бетона класса В22,5 (М300) для тротуарной плитки при прочих равных условиях на 97,15 руб.

Выпуск продукции (объем работ) за отчетный период (июнь - июль) – 14 м³ (200 м²).

Главный бухгалтер

М.М. Мухоморова
(подпись)

Технический директор

С.С. Косов
(подпись)

Управляющий ОАО «КСЗ»

С.С. Косов
(подпись)

Отв. исполнитель

С.С. Косов
(подпись)



ОАО «Костромской силикатный завод»
(предприятие)

Код по ОКПО: 05307720



Смирнов М.А. /

М.П.

11 2015 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ НАУЧНО – ТЕХНИЧЕСКОГО МЕРОПРИЯТИЯ № 2

Настоящим актом подтверждаем применение модифицированного мелкозернистого фибробетона, состоящего из цемента, гиперпластификатора Stachement,
(наименование мероприятия, его шифр по плану)
песка, полипропиленовой фибры и воды в производстве бордюрного камня

выполненных в цехе тротуарной плитки ОАО «Костромской силикатный завод»
(полное наименование предприятия (организации, учреждения), где осуществлено его внедрение)
156604, г. Кострома, ул. Ярославская, 43
цех, участок производства, адрес)

1. Краткое описание и преимущество внедренного мероприятия: применение модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй позволяет снизить энергозатраты, сократить расход цемента, улучшить процесс формовки, повысить качество поверхности, увеличить прочностные и эксплуатационные свойства изделий

2. Дата внедрения август – сентябрь 2015 года

3. Основные показатели, характеризующие результаты внедрения мероприятия:

Наименование показателей	№ строки	Ед. изм.	Расчетный период июнь - июль	Отчетный период август - сентябрь
А	Б	В	1	2
Выпуск продукции (в оптовых ценах предприятия на 30.09.2015)	01	тыс. руб.	829,245	825,569
Число условно высвобожденных работников	11	чел.	-	-
Прирост прибыли (+), уменьшение прибыли (-)	12	тыс. руб.	-	-
Прибыль (+), убыток (-)	13	тыс. руб.	-	-
Экономия от снижения себестоимости продукции (+), удорожание от повышения себестоимости (-)	14	тыс. руб.	-	3,676
Экономический эффект	15	тыс. руб.	-	3,676
Фактические затраты на внедрение, включая затраты прошлых лет	16	тыс. руб.	-	-

4. Социальный, научно-технический, иной положительный эффект, полученный от внедрения:

примененный состав для производства бордюрного камня обладает ранним набором
(охрана окружающей среды, улучшение и оздоровление условий труда, создание новых рабочих мест,

прочности, позволяет увеличить оборачиваемость опалубочных форм и производительность
совершенствование структуры управления, повышение технического уровня, конкурентоспособности продукции,

оборудования, снизить энергозатраты на производство изделий, обогрев и уход за ними
специальные назначения продукции и т.п.)

Приложение:

Изменение затрат на материалы в результате внедрения научно – технического мероприятия

Главный бухгалтер

М.В. Макаров С.В.
(подпись)

Начальник ПТО

В.В. Васильев
(подпись)

Технический директор

В.В. Камаров В.В.
(подпись)

Управляющий ОАО «КСЗ»

В.В. Зотов А.Н.
(подпись)

Группа внедрения:

к.т.н. Попов В.М. В.М. Попов

к.т.н. Цыбакин С.В. С.В. Цыбакин

к.т.н. Соболев Г.М. Г.М. Соболев

инж. Зотов А.Н. А.Н. Зотов

Приложение № 1 к акту внедрения
научно – технического мероприятия № 2

Изменение затрат на материалы в результате внедрения научно – технического мероприятия

Наименование материалов	Расход материалов на 1 м ³ , кг		Стоимость материала, руб.	Стоимость на весь объем, руб.	
	Контрольный состав бетона	Модифицированный состав бетона		Контрольный состав бетона	Модифицированный состав бетона
Цемент М500	651,7	579,3	3,6	2346,12	2085,48
Песок (Хромцовского карьера)	1672,1	1693,4	0,368	615,33	623,17
Добавка Stachement 2061/151.2	-	1,93	120	-	231,3
Добавка Mirasan BWA 16	1,82	-	90	163,8	-
Полипропиленовая фибра	-	0,5	190	-	80
Вода	152,6	167,1	0,02022	3,09	3,37
ИТОГО:				3128,34	3023,32
ИТОГО с затратами на производство:				3691,44	3567,52

Применение модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй позволяет снизить стоимость 1 м³ бетона класса В30 (М400) для бордюрного камня при прочих равных условиях на 105,02 руб.

Выпуск продукции (объем работ) за отчетный период (август - сентябрь) – 35 м³ (780 шт.).

Главный бухгалтер

М.А. Макарова
(подпись)

Технический директор

Касьянов В.В.
(подпись)

Управляющий ОАО «КСЗ»

Супрунов А.А.
(подпись)

Отв. исполнитель

Семов А.А.
(подпись)



Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия
человека

**Федеральное бюджетное учреждение здравоохранения
«Центр гигиены и эпидемиологии в Костромской области»
Испытательный лабораторный центр**

Юридический адрес: Свердлова ул., д. 23, г. Кострома, 156000 тел/факс
Реквизиты: ОКПО 75621180 ОГРН 1054408631640 ИНН/КПП 4401053021/440101001

АТТЕСТАТ АККРЕДИТАЦИИ

зарегистрирован в Реестре органов по сертификации и
аккредитованных испытательных лабораторий (центров)
№ РОСС RU.0001.510668
Срок действия с 13 мая 2014 г. по 13 мая 2019 г.

УТВЕРЖДАЮ



Руководитель ИЛЦ

Н.С.Александрова

м.п.

" 16 " октября 2015 г.

**ПРОТОКОЛ
ЛАБОРАТОРНЫХ ИСПЫТАНИЙ**
№ 10796/1 - 10796/5 от 16 октября 2015 г.

1. Наименование предприятия, организации (заявитель): Ч/л Зотов А.Н.
2. Юридический адрес: г. Кострома, ул. 2-я Центральная, д.3, кв.1.
3. Наименование образца (пробы), дата изготовления: Модифицированный мелкозернистый бетон с полипропиленовой фиброй
4. Изготовитель (фирма, предприятие, организация)
5. Место отбора: г. Кострома, ул. 2-я Центральная, д.3 кв.1.
6. Условия отбора, доставки
Дата и время отбора: 08.10.2015 08:30
Ф.И.О., должность:
Условия доставки: соответствуют НД
Дата и время доставки в ИЛЦ: 13.10.2015 13:00
7. Дополнительные сведения:
Цель исследований, основание: договор № 46-р от 13.10.2015
Проба № 10796/1 - Образец №1
Проба № 10796/2 - Образец №2
Проба № 10796/3 - Образец №3
Проба № 10796/4 - Образец №4
Проба № 10796/5 - Образец №5
8. НД на продукцию: Экспериментальный состав
9. НД, регламентирующие объем лабораторных испытаний и их оценку:
СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)"
10. Код образца (пробы): 03.15.10796

11. Средства измерений:

№ п/п	Тип прибора	Заводской номер	№ свидетельства о поверке	Срок действия
1	Комплекс универсальный спектрометрический УСК "Гамма Плюс"	9827-Ар-Б-Г	№42010.Н004	28.11.2015

Протокол № 10796/1 - 10796/5 распечатан в 2 экз.

стр. 1 из 2

Результаты относятся к образцам (пробам), прошедшим испытания
Настоящий протокол не может быть частично воспроизведен без письменного разрешения ИЛЦ

12. Условия проведения испытаний: Условия проведения испытаний соответствуют нормативным требованиям

Результаты испытаний

№№ п/п	Определяемые показатели	Единицы измерения	Результаты испытаний	Величина допустимого уровня	НД на методы исследований
РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Регистрационный номер пробы в журнале 10796/1 дата начала испытаний 13.10.2015 дата выдачи результата 15.10.2015 16:36					
1	Удельная эффективная активность природных радионуклидов	Бк/кг	34,0±7,0	не более 370	М (методика) 40090.3Н700
РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Регистрационный номер пробы в журнале 10796/2 дата начала испытаний 13.10.2015 дата выдачи результата 15.10.2015 16:36					
1	Удельная эффективная активность природных радионуклидов	Бк/кг	35,0±7,0	не более 370	М (методика) 40090.3Н700
РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Регистрационный номер пробы в журнале 10796/3 дата начала испытаний 13.10.2015 дата выдачи результата 15.10.2015 16:37					
1	Удельная эффективная активность природных радионуклидов	Бк/кг	35,0±7,0	не более 370	М (методика) 40090.3Н700
РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Регистрационный номер пробы в журнале 10796/4 дата начала испытаний 13.10.2015 дата выдачи результата 15.10.2015 16:38					
1	Удельная эффективная активность природных радионуклидов	Бк/кг	32,0±7,0	не более 370	М (методика) 40090.3Н700
РАДИОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ Регистрационный номер пробы в журнале 10796/5 дата начала испытаний 13.10.2015 дата выдачи результата 15.10.2015 16:38					
1	Удельная эффективная активность природных радионуклидов	Бк/кг	34,0±7,0	не более 370	М (методика) 40090.3Н700

Ф.И.О., должность лица, ответственного за оформление протокола:


Кашицына А. С.

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Костромская Государственная Сельскохозяйственная Академия

ОАО «КОСТРОМСКОЙ СИЛИКАТНЫЙ ЗАВОД»

РЕКОМЕНДАЦИИ

**ПО ПОДБОРУ СОСТАВОВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ФИБРОБЕТОНОВ
ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ**

Настоящие Рекомендации разработаны на основании научно - исследовательских работ, выполненных кафедрой «Технология, организация и экономика строительства» Костромской государственной сельскохозяйственной академии, производственных испытаний строительной лаборатории Открытого акционерного общества «Костромской силикатный завод» и материалов научно-технических конференций и семинаров.

Для научных и инженерно - технических работников и аспирантов соответствующего профиля, а также студентов строительных и транспортных вузов.

Авторы Рекомендаций:

профессор, кандидат технических наук Г.М. Соболев;
доцент, кандидат технических наук С.В. Цыбакин;
инженер А.Н. Зотов.

ОАО «Костромской силикатный завод»

УТВЕРЖДАЮ



Управляющий предприятием

ОАО «Костромской силикатный завод»

(Смирнов М.А.)

20 » ноября 2015 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО ПОДБОРУ СОСТАВОВ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ ФИБРОБЕТОНОВ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие рекомендации предназначены для подбора и оптимизации составов модифицированного мелкозернистого бетона и фибробетона, а также проектирования и изготовления изделий и конструкций для дорожного строительства на их основе.

1.2. Под мелкозернистым (песчаным) цементным бетоном понимают структурную разновидность дорожного бетона, отличающегося однородным характером строения из-за отсутствия крупного заполнителя (щебня, гравия), а также обязательным применением водоредуцирующих добавок и поверхностно-активных веществ (ПАВ).

Мелкозернистый фибробетон – исходный бетон, армированный равномерно распределенными по всему объему металлическими, минеральными и синтетическими волокнами.

Фибробетонные изделия и конструкции могут быть с фибровым и комбинированным армированием.

1.3. Рекомендации распространяются на мелкозернистые бетоны и фибробетоны классов до В70 (М 900) по прочности при сжатии, марок до F 600 по морозостойкости и W 18 по водонепроницаемости.

1.4. Требуемые показатели качества бетона и фибробетона обеспечиваются:

- соответствующим выбором и тщательным исследованием материалов;
- применением специальных химических добавок, обеспечивающих эффективное влияние на технологические, прочностные и эксплуатационные свойства бетонов и фибробетонов;
- использованием различных тонкодисперсных наполнителей (минеральных порошков и отходов промышленности);
- применением фибры с высокими эксплуатационными характеристиками при учете оптимального коэффициента фибрового армирования;
- соблюдением последовательности проектирования составов, приготовления смеси, технологии изготовления и формования изделий, а также методов ухода, хранения и транспортировки готовой продукции;

- определением состава смеси расчетно-экспериментальным методом с учетом свойств применяемых компонентов и использованием формул, графиков и таблиц без предварительного подбора контрольного состава без добавки.

1.5. Расчетный состав бетона проверяется на пробных замесах в лабораторном смесителе принудительного или гравитационного действия, исходя из заданных показателей подвижности смеси и прочности бетона и фибробетона. При необходимости – корректируется и передается на производство.

1.6. Приготовление опытных замесов объемом до 15 л при подборе состава бетона и фибробетона без структурообразующих добавок допускается производить вручную на предварительно увлажненном противне с перемешиванием в течение 3-5 мин. При этом замесы начинают с перемешивания сухих материалов, а затем постепенно добавляют назначенное по расчету количество воды и раствора добавки.

1.7. Составы бетона и фибробетона для опытных замесов рекомендуется рассчитывать методом абсолютных объемов.

1.8. При проектировании бетонов и фибробетонов следует учитывать возможности формовочного оборудования и требования заводов-изготовителей к применяемым составам, а также особенности технологической схемы производства, степень и вид армирования изделий и конструкций, их массу и габариты, требования к качеству уплотнения бетонной смеси и качеству поверхности изделия, номенклатуру и объем производства изделий, изготавливаемых заводом.

1.9. Производственный состав бетона рассчитывается с учетом влажности заполнителей, применяемых для приготовления бетона. При этом корректируется и контролируется количество воды затворения при изменении влажности заполнителей. В готовых смесях регулирование подвижности путем дополнительного введения добавок разжижающего действия или ускоряющих схватывание недопустимо.

2. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

2.1. Мелкозернистые бетоны и фибробетоны применяют для изготовления в заводских условиях элементов мощения, бортового камня, элементов смотровых колодцев, лотков теплотрасс и дорожных водоотводных, напорных труб, покрытий и оснований дорог и т.д.

2.2. Мелкозернистые бетоны и фибробетоны в монолитных конструкциях с особыми требованиями по надежности и долговечности без экспериментального обоснования применять не рекомендуется.

2.3. Рационально запроектированные мелкозернистые бетоны и фибробетоны обладают высокими прочностными и эксплуатационными характеристиками (водонепроницаемостью, морозостойкостью, трещиностойкостью и высокой адгезией), и могут быть применены при

соответствующем технико-экономическом обосновании в конструкциях мостовых и гидротехнических сооружений.

3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ

3.1. ТРЕБОВАНИЯ К ВЯЖУЩИМ

3.1.1. В качестве вяжущего для приготовления мелкозернистого бетона и фибробетона следует использовать портландцемент, шлакопортландцемент и сульфатостойкий цемент, соответствующие требованиям ГОСТ 30515-97, ГОСТ 31108-2003 и ГОСТ 22266-94.

3.1.2. В целях совершенствования структуры бетонов и фибробетонов, снижения усадки цементного камня и экономии цемента допускается применение многокомпонентных и композиционных (полученных механохимической активацией) вяжущих при сохранении требуемых технологических и прочностных свойств. Добавки – микронаполнители в составе вяжущего принимают по ГОСТ 24640-91.

3.1.3. В качестве активных тонкодисперсных добавок применяются: молотые доменные шлаки, отработанная формовочная смесь, торфяная зола гидроудаления, чистые кварцевые пески, микрокремнезем и другие добавки природного и техногенного происхождения.

Основные виды и рекомендуемый расход активных добавок в составе вяжущего приведены в таблице 1.

Таблица 1

Основные виды и рекомендуемый расход активных добавок

Добавка - микронаполнитель	Дозировка, % от массы вяжущего	
	Оптимальная	Максимальная
Микрокремнезем	2-14	30
Отработанная формовочная смесь	5-40	80
Торфяная зола гидроудаления	10-20	40
Молотые доменные шлаки	15-50	80
Чистый кварцевый песок	5-15	40

3.1.4. Испытание вяжущего следует производить по ГОСТ 310.3 – 76*, ГОСТ 310.4 – 81* и ГОСТ 30744-2001. Песок для испытаний вяжущего должен соответствовать ГОСТ 6139-2003.

3.1.5. Для бетонов и строительных растворов следует применять цемент Д0 или Д5 с содержанием трехкальциевого алюмината (C_3A) не более 8 %. Количество щелочных оксидов в пересчете на Na_2O не должно превышать 0,8 % массы цемента. Марка цемента принимается не менее 500 кгс/см². Минимальная прочность (активность) цемента должна быть не менее 42,5 МПа, а для высокопрочных бетонов и фибробетонов ($R_b \geq 60$ МПа) – не менее 52,5 МПа и нормальной густотой цементного теста не более 27 %. Не рекомендуется применять портландцемент с признаками ложного схватывания.

3.2. ТРЕБОВАНИЯ К НАПОЛНИТЕЛЮ

3.2.1. В качестве мелкого заполнителя для бетонов и фибробетонов рекомендуется применять природные кварцевые или кварцево-полевошпатовые пески с модулем крупности не менее 2,5 и полным остатком на сите с отверстиями 0,63 мм не менее 50 %, а также пески из отсевов дробления и их смеси, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8736-93* и ГОСТ 8735-88*.

3.2.2. Для бетонов дорожных конструкций, мостовых и гидротехнических сооружений допускается применять пески с модулем крупности не менее 2,0 и полным остатком на сите 0,63 мм не менее 30 %. Применение мелкого природного песка с модулем крупности 1,5–2,0 с полным остатком на сите с 0,63 мм 10-30 % разрешается для бетона подземных (подводных) конструкций. При этом мелкие пески с модулем крупности менее 2,0 должны использоваться при обязательном применении поверхностно – активных добавок.

3.2.3. Содержание в песке пылевидных и глинистых частиц в сумме не должно превышать по массе:

- для бетона пролетных строений и мостовых конструкций, эксплуатируемых в условиях переменного уровня воды – 2,0 %;
- для бетона предварительно напряженных пролетных строений, эксплуатируемых в районах со средней температурой наружного воздуха наиболее холодной пятидневки ниже минус 40 °С – 1,0 %;
- для бетона всех прочих конструкций – 3% (в т. ч. глины 2%);
- для гидротехнических бетонов: в зоне переменного уровня воды - 2,0 %; в надводной зоне - 3,0 %; для подводного бетона и бетона внутренней зоны – 5,0 % (в том числе содержание слюды 1, 2 и 3 % соответственно).

Применение мелкого заполнителя с содержанием глины в виде отдельных комков не допускается.

3.3. ТРЕБОВАНИЯ К ДОБАВКАМ

3.3.1. Химические добавки, применяемые в бетонах и фибробетонах, должны соответствовать требованиям ГОСТ 24211-2008. Испытание добавок и определение их эффективности следует выполнять по ГОСТ 30459-2008.

3.3.2. Общее количество химических добавок не должно превышать максимальных дозировок, указанных производителем, и быть не более 5% массы цемента.

3.3.3. Добавки, используемые в количестве менее 0,2 % от массы цемента, должны вводиться в бетонную смесь с водой затворения. В малоподвижные и умеренно-жесткие смеси раствор добавки более 0,2 % вводится после затворения и тщательного перемешивания смеси.

Введение водного раствора добавки в сухие компоненты смеси запрещено.

3.3.4. Совместимость добавок с компонентами бетона и фибробетона и между собой должна быть проверена при подборе составов.

3.3.5. В качестве полифункциональных добавок, улучшающих технологические свойства бетонной смеси и качество бетона, следует применять супер- и гиперпластификаторы на основе продуктов конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида и поликарбоксилатов.

Наиболее распространенными суперпластификаторами являются СП С-3, DIAMOND CONCRETE (DC), Хидетал-ГП, SIKА, Glenium, STACHEMENT, Melflux, FLEM GIPER.

Краткие характеристики добавок и нормы их расхода приведены в приложении 12.

3.3.6. Эффективные добавки чаще всего выпускаются в виде водного раствора, поэтому при определении дозировок в перерасчете на сухое вещество следует учитывать концентрацию добавки и ее плотность.

3.3.7. Дозировки различных марок супер- и гиперпластификаторов следует принимать по рекомендациям заводов-изготовителей или определять экспериментальным путем в процессе подбора состава бетона. Использование комплексных добавок допускается после предварительной проверки требуемых свойств бетонных смесей и бетонов и технико-экономического обоснования целесообразности их применения.

3.4. ТРЕБОВАНИЯ К ФИБРЕ

3.4.1. При проектировании фибробетонных изделий и конструкций рекомендуется применять мультифиламентные, фибриллированные и порошковые волокна из полипропилена, полиэтилена, стекла, базальта, нейлона, углерода, арамида или карбона при соответствующих предварительных испытаниях и технико – экономическом обосновании.

3.4.2. Размеры и расход микроволокон принимаются с учетом вида, назначения, способа армирования и условий эксплуатации изделий и конструкций, технологических требований по их изготовлению, с целью максимального использования прочностных свойств и обеспечения долговечности фибробетона.

3.4.3. Область применения и требования по безопасному изготовлению, хранению, применению и утилизации волокон, их физико – механические и химические показатели качества, методы испытаний, определение массовой доли замасливателя выполняются в соответствии с ГОСТ 29332-2006, ГОСТ Р 52581-2006, ГОСТ 17139-2000 и ГОСТ Р 51626-2000.

3.4.4. Описание, область применения, технические свойства и нормы расхода разных типов фибр представлены в приложении 13.

3.5. ТРЕБОВАНИЯ К ВОДЕ

3.5.1. Вода для затворения бетонных и фибробетонных смесей должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732-2011.

3.5.2. Для приготовления водных растворов химических добавок рекомендуется использовать питьевую воду.

4. ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ФИБРОБЕТОНА

4.1. Выбор вяжущего и других компонентов смеси зависит от назначения изделий и конструкций и предъявляемых к ним требованиям по эксплуатации. Особенности условия работы изделий и конструкций и технические характеристики материалов для их изготовления должны приниматься по СП

28.13330., СП 34.13330., СП 41.13330., СП 45.13330., СП 46.13330., СП 70.13330. и СП 78.13330.

4.2. Оптимальные дозировки цементов и процент замещения их активными минеральными добавками необходимо принимать согласно СНиП 82-02-95.

4.3. Для конструкций мостовых и гидротехнических сооружений минимальный расход цемента принимается в соответствии с СП 46.13330.2012 и должен быть не менее:

- 230 кг/м³ при расположении ниже глубины промерзания и возможного размыва дна;

- 260 кг/м³ при расположении в подводной и надводной (надземной) частях сооружения;

- 290 кг/м³ при расположении в пределах переменного уровня воды или промерзания грунта и мостовом полотне.

Граничные условия по составу смесей и минимальный расход цемента в бетонах, работающих в неагрессивных и агрессивных средах, в зависимости от вида конструкций и условий их эксплуатации, определяют по приложению 9.

4.4. Максимальный расход цемента для класса бетона составляет:

- до В35 включительно – 450 кг/м³;

- В40 включительно – 500 кг/м³;

- В45 и выше – 550 кг/м³.

4.5. Рекомендуемые и допускаемые марки цемента для мелкозернистого бетона при твердении в естественных условиях и при действии тепловой обработки принимаются по приложению 10.

4.6. Подвижность бетонной и фибробетонной смеси принимается по приложению 8 и выбирается в зависимости от вида и размеров конструкции, степени армирования, способа перемешивания и транспортировки, особенностей и технических характеристик бетоноперекачивающих машин и способов уплотнения и формовки.

4.7. В процессе приготовления, транспортировки и укладки в мелкозернистой бетонной смеси изменяется количество вовлеченного воздуха, зависящее в основном от модуля крупности песка. В ориентировочных расчетах составов на 1 м³ бетонной смеси рекомендуется принимать поправки на воздухововлечение в зависимости от технических свойств песка и удобоукладываемости смеси по таблице 2.

Таблица 2

Технические свойства песка и воздухововлечение смеси

Модуль крупности песка M_K		Водопотребность песка, %	Воздухововлечение смеси, %	
			Подвижной	Жесткой
Мелкий	1,5÷2,0	8...10	4	8
Средний	2,0÷2,5	6...8	3	6
Крупный	2,5÷3,0	5...6	2	5

4.8. Способы формования и удобоукладываемость бетонной и фибробетонной смеси для различных дорожных конструкций и изделий следует назначать в соответствии с требованиями СП 130.13330.

4.9. При возведении монолитных конструкций при помощи автобетононасосов должны применяться подвижные смеси с осадкой конуса более 8 см.

4.10. При использовании химических добавок следует учитывать их критерий эффективности и руководствоваться рекомендациями заводов-изготовителей по их применению.

Гиперпластификаторы в основном выпускаются в виде жидкости с различной концентрацией и обладают высокой водоредуцирующей способностью, поэтому следует максимально точно производить их дозировку и соблюдать последовательность введения в смесь.

4.11. Погрешность дозирования исходных материалов весовыми дозаторами не должна превышать $\pm 1\%$ для цемента, воды, химических и минеральных добавок, $\pm 2\%$ – для наполнителей.

4.12. Объем вовлеченного воздуха в бетонных и фибробетонных смесях для бетонов с нормированной морозостойкостью на месте укладки должен быть в пределах:

- 2 - 4 % - для бетона мостовых конструкций;
- 5 - 6 % - для полотен и покрытий проезжей части мостов;
- 5 - 7 % - для бетона конструктивных слоев дорог и аэродромов.

В бетонах и фибробетонах покрытий следует одновременно применять суперпластификатор, воздухововлекающую или газообразующую добавку.

4.13. Максимальное водоцементное отношение для требуемых марок по морозостойкости и водонепроницаемости следует назначать:

- 0,45 - 0,5 - для железобетонных и тонкостенных бетонных конструкций толщиной менее 0,5 м;
- 0,47 - для бетонов, твердеющих в естественных условиях и слабоминерализованной воде при общем содержании солей не более 5 г/л, и массивных бетонных конструкций и блоков облицовки;
- 0,45 - для бетона покрытия дорог и аэродромов;
- 0,9 - для бетона основания дорог и аэродромов;
- 0,65 - для подземных конструкций мостов.

4.14. Состав бетона и фибробетона подбирают исходя из условия обеспечения среднего уровня прочности, значение которого следует определять по ГОСТ 18105-2010 исходя из коэффициента вариации прочности 13,5 %.

Общие требования по прочности, морозостойкости, водонепроницаемости и водопоглощению дорожных изделий и конструкций приведены в приложении 14.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА МОДИФИЦИРОВАННОГО МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ФИБРОБЕТОНА

5.1. Общие положения.

Активные минеральные добавки природного происхождения или полученные из отходов промышленности вводят в смесь для экономии цемента и получения фибробетона плотной структуры даже при высоком соотношении

между песком и цементом. Тонкодисперсные добавки следует рассматривать как составную часть многокомпонентного вяжущего, но при этом необходимо учитывать их реакционные способности, особенности введения и способы перемешивания с цементом.

Гиперпластификаторы вводят для уменьшения количества воды затворения, получения заданных технологических свойств смеси и повышения прочностных и эксплуатационных характеристик бетонов и фибробетонов.

Введение микроволокон в мелкозернистый бетон улучшает его технические характеристики, повышает долговечность и межремонтный ресурс конструкций, что позволяет расширить их область применения в агрессивных средах и суровых климатических условиях.

Подбор состава модифицированного мелкозернистого фибробетона должен заключаться в определении такого соотношения компонентов, при котором требуемые свойства смеси и композита достигаются при минимальном расходе многокомпонентного вяжущего, рациональном использовании химической добавки и оптимальном коэффициенте фибрового армирования.

5.2. Исходные данные для определения состава модифицированного мелкозернистого фибробетона включают в себя следующее:

- прочностные характеристики бетона и фибробетона;
- технологические свойства бетонной и фибробетонной смеси;
- вид цемента и активной добавки в составе многокомпонентного вяжущего и их технические свойства;
- активность цемента или многокомпонентного вяжущего;
- показатели качества песка (мелкого заполнителя);
- вид применяемой добавки и концентрацию ее водного раствора;
- вид, геометрические размеры, физико – механические и химические свойства фибры и ее оптимальный коэффициент армирования.

5.3. Требуемые сопротивления бетона и фибробетона осевому сжатию R_b и растяжению при изгибе R_{tb} (МПа) для сборных и монолитных конструкций рассчитывают по формуле:

$$\begin{cases} R_b = B \cdot K_T \\ R_{tb} = B_{tb} \cdot K_T \end{cases}, \quad (1)$$

где B , B_{tb} - класс бетона по прочности на сжатие и на растяжение при изгибе МПа; $K_T = 1,28$ - коэффициент требуемой прочности для всех видов бетонов (кроме плотного силикатного и ячеистого).

5.4. Расчетную прочность бетона на растяжение при изгибе R_{tb} , в МПа, находят по формуле:

$$R_{tb} = 0,08 \cdot (10 \cdot R_b)^{2/3}, \quad (2)$$

где R_b – требуемая прочность бетона на сжатие, МПа;

5.5. Расчет расхода фибры (микроволокон) необходимо выполнять при несоблюдении условия $R_{tb} > R_T$ (расчетная прочность бетона на растяжении при изгибе больше требуемой) по формуле:

$$\Phi_{\text{ПП}} = \frac{R_{\text{fb}} - R_{\text{T}}}{K_{\text{fb}}}, \quad (3)$$

где $\Phi_{\text{ПП}}$ – расход полипропиленовой фибры, кг/м³, K_{fb} – коэффициент влияния фибры на прочность на растяжение при изгибе (устанавливается экспериментально для всех видов фибры).

5.6. Назначаем максимальный расход цемента C_{max} или вяжущего в соответствии с пунктом 4.4.

5.7. Оптимальное количество активной добавки (микрокремнезема) в составе многокомпонентного вяжущего можно определить по следующей зависимости:

$$MK = \left| \frac{125 - 2 \cdot R_{\text{b}} + 0,03 \cdot R_{\text{ц}}}{C_{\text{max}}} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

где МК – расход микрокремнезема, % от общей массы вяжущего; $R_{\text{ц}}$ – активность цемента, МПа.

5.8. Расход цемента в составе многокомпонентного вяжущего (МКВ) определяется по формуле:

$$C = C_{\text{max}} \cdot (1 - 0,01 \cdot MK), \quad (5)$$

5.9. Определяем основные технические показатели многокомпонентного вяжущего:

- Общая масса на 1 м³ бетона и фибробетона (кг):

$$MKB = C + 0,01 \cdot MK \cdot C_{\text{max}} \quad (6)$$

- Истинная плотность (т/м³):

$$\rho_{\text{МКВ}} = \rho_{\text{ц}} - 0,01 \cdot MK \cdot (\rho_{\text{ц}} - \rho_{\text{МК}}), \quad (7)$$

где $\rho_{\text{ц}}$, $\rho_{\text{МК}}$ – истинные плотности цемента и микрокремнезема, т/м³.

- Активность (прочность) (МПа):

$$R_{\text{МКВ}} = R_{\text{ц}} - 0,002 \cdot MK^3 + 0,019 \cdot MK^2 - 0,294 \cdot MK \quad (8)$$

5.10. Определяем требуемое водовязущее отношение:

$$\left(\frac{B}{B} \right)_{\text{ТР}} = \frac{0,386 \cdot R_{\text{МКВ}}}{R_{\text{b}} + 0,165 \cdot R_{\text{МКВ}}} \quad (9)$$

5.11. Ориентировочный расход гиперпластификатора с учетом требуемой подвижности и жесткости смеси определяем по формуле:

$$ГП = 10^{k_{\text{inf}}}, \quad (10)$$

где ГП – расход гиперпластификатора в перерасчете на сухое вещество, % от общей массы вяжущего; k_{inf} – коэффициент влияния гиперпластификатора на удобоукладываемость смеси (принимается по таблице 3).

5.12. Требуемое количество воды затворения находим с учетом концентрации водного раствора химической добавки:

$$B_{\text{ТР}} = MKB \cdot \left(\left(\frac{B}{B} \right)_{\text{ТР}} - ГП \cdot \left(\frac{1}{K} - 0,01 \right) \right), \quad (11)$$

где K – концентрация химической добавки, %.

5.13. Определяем оптимальное соотношение песка и вяжущего:

$$n = \rho_{\Pi} \cdot \left(\left(\frac{1000 - 1,099 \cdot \Phi_{\text{ПП}} - 10 \cdot \text{ВВ}}{\text{МКВ}} \right) - \left(\frac{1}{\rho_{\text{МКВ}}} + \left(\frac{B}{B} \right)_{\text{ГР}} + 0,01 \cdot \frac{\text{ГП}}{\rho_{\text{ГП}}} \right) \right), \quad (12)$$

где ВВ – объем вовлеченного воздуха, % (табл. 2); $\rho_{\text{ГП}}$ – истинная плотность гиперпластификатора (сухого порошка), т/м³; ρ_{Π} – истинная плотность песка, т/м³.

Таблица 3

**Значение коэффициента влияния добавки в зависимости
от марки смеси по осадке конуса и жесткости**

Удобоукладываемость по показателям		Коэффициент влияния добавки k_{inf} на удобоукладываемость
подвижности, ОК, см	жесткости, Ж, с	
-	Ж2 11 - 20	$k_{\text{inf}} = \frac{0,224 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,133}$
-	Ж1 5 - 10	$k_{\text{inf}} = \frac{0,231 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,125}$
П1 1 - 4	-	$k_{\text{inf}} = \frac{0,359 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,074}$
П2 5 - 9	-	$k_{\text{inf}} = \frac{0,361 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,084}$
П3 10 - 15	-	$k_{\text{inf}} = \frac{0,37 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,093}$
П4 16 - 20	-	$k_{\text{inf}} = \frac{0,428 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,058}$
П5 более 20	-	$k_{\text{inf}} = \frac{0,444 - (B/B)_{\text{ГР}}}{0,084}$

5.14. Проверяем среднюю плотность и выход смеси:

$$\rho_{\text{fb}} = \text{Ц} + \text{МК} + \text{П} + \text{ГП} + \Phi_{\text{ПП}} + \text{В} \quad (13)$$

$$V_{\text{fb}} = V_{\text{Ц}} + V_{\text{МК}} + V_{\text{П}} + V_{\text{ГП}} + V_{\Phi} + \text{В} + \text{ВВ}, \quad (14)$$

где $V_{\text{Ц}}$ – объем цемента, дм³; $V_{\text{МК}}$ – объем микрокремнезема, дм³; $V_{\text{П}}$ – объем песка, дм³; $V_{\text{ГП}}$ – объем сухого гиперпластификатора, дм³; V_{Φ} – объем полипропиленовой фибры, дм³; В – общий объем воды затворения, дм³; ВВ – объем вовлеченного воздуха, дм³.

5.15. Находим значения структурных характеристик С и W:

$$C_{\text{МКВ}} = \frac{\text{МКВ}}{1000} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{МКВ}}} + W \right) \quad (15)$$

$$W = \left(\frac{B - B_{\text{ЗАП}}}{\text{МКВ}} \right) \quad (16)$$

5.16. Находим прогнозируемые значения морозостойкости и водонепроницаемости:

$$F = 500 + 9,2 \cdot MK + 70 \cdot ГП + 118,3 \cdot \Phi_{III} - 0,53 \cdot MK^2 - 276,7 \cdot ГП^2 - 50 \cdot \Phi_{III}^2 \quad (17)$$

$$F = 440 + 15,8 \cdot MK + 35 \cdot ГП + 59,2 \cdot \Phi_{III} - 0,9 \cdot MK^2 - 138,4 \cdot ГП^2 - 25 \cdot \Phi_{III}^2 - 736,5 \cdot W + 455 \cdot C + 441,5 \cdot W^2 - 419 \cdot C^2 \quad (18)$$

$$W = 8,67 + 1,6 \cdot MK + 20 \cdot ГП + 4,7 \cdot \Phi_{III} - 0,08 \cdot MK^2 - 37,33 \cdot ГП^2 - 1,03 \cdot \Phi_{III}^2 \quad (19)$$

5.17. Окончательный выбор и уточнение состава модифицированного мелкозернистого фибробетона, обеспечивающего заданные технологические и прочностные показатели качества, устанавливаются путем изготовления и испытания контрольных образцов.

6. ПРИГОТОВЛЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФИБРОБЕТОННОЙ СМЕСИ

6.1. Важным фактором для получения композитов однородной структуры является технология изготовления фибробетона, заключающаяся в рациональном проектировании составов, поэтапной загрузке компонентов смеси, контроле над их перемешиванием, правильным введением минеральных, химических добавок и фибры и выбора оптимального способа формования и укладки фибробетона.

6.2. Приготовление бетонных и фибробетонных смесей следует производить в бетоносмесителях периодического действия.

Жесткие и малоподвижные смеси с осадкой конуса 2 см и менее следует приготавливать в бетоносмесителях принудительного действия. Смеси с воздухововлекающими кремнийорганическими добавками при любой подвижности следует приготавливать в бетоносмесителях принудительного действия.

6.3. Приготовление лабораторных составов бетонных смесей производят на сухих наполнителях и заполнителях. Без предварительной сушки необходимо произвести корректировку воды затворения смеси с учетом фактической влажности компонентов.

6.4. Компоненты смеси при зимнем бетонировании должны удовлетворять всем требованиям, которые предъявляются для бетонов, укладываемых в летних условиях. Перед загрузкой в смеситель заполнители не должны содержать смерзшихся комьев, кусков льда, наледи на зернах и снега. Для их уменьшения или исключения необходимо складировать материалы высокими штабелями на сухих и возвышенных местах, защищенных от снежных заносов.

6.5. Оттаивание и подогрев заполнителей может производиться в открытых штабелях (с помощью дымовых газов и горячего воздуха), закрытых бункерах, сушильных барабанах и других устройствах. Подогрев воды для бетонной смеси наиболее просто и эффективно осуществлять посредством пуска в нее пара.

6.6. Все виды микроволокон в смеси можно перемешивать в любом типе смесителей (принудительного или гравитационного типа), в том числе в

автобетоносмесителях, при этом отсутствуют проблемы, связанные с их неравномерным распределением в смеси (образованием нераспределенных и перепутанных в смеси пучков волокон).

Рекомендуется вводить и перемешивать волокна следующими способами:

1) Перемешивание фибры с сухими компонентами смеси (щебень, песок, цемент, микронаполнитель), затем введение воды затворения, водных растворов химических добавок (при расходах более 0,25 % от массы вяжущего) и окончательное смешивание до готовности. Время перемешивания фибробетонной смеси увеличивается на 15%.

2) Введение волокон осуществляется после перемешивания сухих компонентов смеси, затворения их водой и водными растворами химических добавок. После тщательного перемешивания производится введение волокна в работающий смеситель. Время смешивания также увеличивается на 15 – 20 %.

3) Загрузка полипропиленовой фибры в автобетоносмеситель на заводе осуществляется после перемешивания бетонной смеси в «миксере». Времени доставки до места приемки и укладки фибробетонной смеси достаточно для полного диспергирования волокон.

4) В условиях строительной площадки в готовую бетонную смесь, доставленную автобетоносмесителем, волокна засыпают вручную по частям или дозировано в бумажных мешках порциями не более 1 кг. При этом время перемешивания фибробетонной смеси составляет 5-10 минут в зависимости от подвижности.

6.7. Продолжительность перемешивания фибробетонных смесей должна составлять не менее 3 мин и уточняться экспериментально с учетом технологических требований.

В зависимости от марки смеси по удобоукладываемости продолжительность перемешивания принимается по таблице 4.

Таблица 4

**Минимальная продолжительность перемешивания смесей
мелкозернистых бетонов и фибробетонов**

Вместимость смесителя, л	Продолжительность перемешивания, сек, не менее					
	в гравитационных смесителях марок по удобоукладываемости			В смесителях принудительного действия при В/Ц		
	Ж1; П1	П2	П3 - П5	< 0,3	0,3 - 0,4	> 0,4
< 750	90	75	60	80	60	50
750-1500	120	105	90	100	70	50
>1500	150	135	120	120	80	50

При приготовлении жестких смесей (П1 – Ж5) для вибропрессованных изделий полипропиленовая фибра вводится в начале перемешивания сухих или влажных компонентов смеси, через 1,5-2 минуты добавляется вода и смесь перемешивается еще 1,5-3 минуты.

При производстве подвижных смесей (П3 – П5) полипропиленовая фибра

вводится в последнюю очередь (после затворения компонентов водой и тщательного перемешивания смеси) и повторно перемешивается в течение 0,3-1 минуты.

6.8. Для уменьшения расхода цемента, снижения вязкости фибробетонной смеси и энергоёмкости ее приготовления, а также для замедления потери ее подвижности рекомендуется ограничивать температуру смеси 30 °С.

6.9. Транспортирование фибробетонной смеси можно производить любым способом (в бетоноукладчиках, транспортерах, автобетоносмесителями, автотранспортом и пневмотранспортом), не вызывающим расслоения смеси.

Рекомендуемое время транспортирования фибробетонной смеси с полифункциональными добавками не должно превышать 60 мин., время от момента приготовления бетонной смеси до её уплотнения - 120 мин.

Максимальное время и дальность транспортирования бетонных и фибробетонных смесей по дорогам с жестким покрытием в теплое и холодное время года (при $V=30$ км/ч) определяется по таблицам 5 и 6.

Таблица 5

Допустимые продолжительность транспортирования бетонных и фибробетонных смесей в теплое время года

Марка смеси по удобоукладываемости и	Температура, °С		Время транспортирования, мин	
	воздуха	смеси	автобетоносмесителем	автосамосвалом
Ж2 - Ж1	20÷30	18÷20	210	60
П1			210	60
П2			150	50
П3			110	40
П4 - П5			90	30

6.10. Требуемые показатели качества фибробетонной смеси (удобоукладываемость, содержание вовлечённого воздуха, однородность и др.) проверяются на месте укладки монолитного бетона (на стройплощадке) с учётом времени и условий транспортировки и необходимых технологических перерывов.

Таблица 6

Допустимые продолжительность и дальность транспортирования бетонных и фибробетонных смесей в холодное время года

Температура воздуха, °С	Температура смеси, °С	Максимально допустимые значения	
		дальность транспортирования, км	время транспортирования, мин
от -40 до -50	от +30 до +45	15	30
от -30 до -40	от +20 до +30	22,5	45
от -20 до -30	от +10 до +20	30	60
от 0 до -30	от +20 до +30	30	60
от 0 до -30	от +10 до +20	45	90

6.11. При использовании жестких и малоподвижных смесей высокопрочных бетонов и фибробетонов, особенно при повышенной температуре, время после перемешивания до укладки смесей рекомендуется ограничивать до 30 мин.

7. ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ

7.1. Укладка бетонных и фибробетонных смесей в форму должна осуществляться в соответствии с технологической картой на изготовление конструкции и с учетом вида и возможностей формовочных машин и механизмов.

7.2. Уплотнение бетонных и фибробетонных смесей следует производить глубинным и поверхностным вибрированием, вибровакуумированием, виброштампованием, вибропротяжкой и т.д.

7.3. Для получения композита слитного строения коэффициент виброуплотнения смеси должен приниматься по таблице 7.

Таблица 7

Рекомендуемые значения коэффициента уплотнения смеси

Вид смеси	Марка смеси по удобоукладываемости			
	СЖЗ-СЖ1	Ж4-Ж2	Ж1-П2	П3-П5
Тяжелый бетон с крупным заполнителем	0,92 - 0,93	0,95 - 0,96	0,96 - 0,97	0,97 - 0,98
Мелкозернистый бетон	0,93 - 0,94		0,97 - 0,98	0,98 - 0,99

7.4. Длительность и интенсивность виброуплотнения смесей с воздухововлекающими добавками должны обеспечить сохранение в бетоне требуемого количества вовлеченного воздуха.

7.5. Рекомендуется бетонировать изделия и конструкции так, чтобы поверхности, подвергающиеся в условиях эксплуатации влиянию внешних воздействий, были обращены при формировании к бортовой опалубке или днищу.

7.6. Замораживание и размораживание приготовленной бетонной смеси и свежееуложенного бетона не допускается.

8. ТВЕРДЕНИЕ ОБРАЗЦОВ И ИЗДЕЛИЙ

8.1. Контрольные образцы для определения прочностных характеристик, морозостойкости и водонепроницаемости бетонов и фибробетонов изготавливаются и испытываются в соответствии с ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 18105-2010, ГОСТ 31914 – 2012, ГОСТ 12730.3 – 78, ГОСТ 12730.5 – 84, ГОСТ 17624-2012 и ГОСТ 10060 – 2012.

Соотношения между классами бетона по прочности при сжатии, на осевое растяжение и на растяжение при изгибе и марками определяются по приложению 11.

8.2. Контрольные образцы сборных конструкций должны твердеть в одинаковых с конструкциями условиях до определения отпускной или передаточной прочности.

Контрольные образцы, изготовленные на строительной площадке для контроля и оценки прочности бетона партий монолитных конструкций, должны твердеть в условиях, предусмотренных проектом производства работ или технологическим регламентом на производство монолитных бетонных и железобетонных конструкций данного объекта строительства.

Последующее твердение образцов, предназначенных для определения прочности бетона в проектном возрасте, должно проходить в нормальных условиях при температуре (20 ± 2) °С и относительной влажности воздуха (95 ± 5) %.

8.3. Твердение монолитных и вибропрессованных изделий и конструкций из фибробетона в естественных условиях при сохранении положительной температуры и с соблюдением правил влажного ухода должно продолжаться не менее 14 суток.

8.4. Для ускорения процесса твердения бетонные и фибробетонные изделия возможно применение тепловлажностной обработки, электропрогрева, воздушного обогрева и т.д.

8.5. Прочность морозостойких бетонов с воздухововлекающими добавками, в том числе комплексными, к моменту замерзания бетона должна составлять не менее 70 % от проектной, без воздухововлекающих – не менее 100 %.

Отпускная прочность сборных рядовых конструкций в летнее время составляет не менее 70 %, в зимнее – не менее 85 %; несущих конструкций мостовых и гидротехнических сооружений – не менее 100 % от проектной.

9. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА БЕТОНОВ И ФИБРОБЕТОНОВ

9.1. Контроль качества компонентов смеси, их дозировки, приготовления и укладки, удобоукладываемости и коэффициента уплотнения бетонной и фибробетонной смеси, а также режимов твердения изделий и конструкций из них осуществляется с соблюдением требований действующих ГОСТ, технологических регламентов и настоящих Рекомендаций.

9.2. Качество затвердевших бетонных и фибробетонных изделий проверяется внешним осмотром и испытанием контрольных образцов в соответствии с ГОСТ 13015-2012 "Изделия железобетонные и бетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения".

9.3. Периодические испытания конструкций следует проводить при внесении конструктивных изменений (смене составов и показателей качества бетонов, схем армирования), изменении технологии производства и в процессе серийного производства плит не реже одного раза в год.

Оценка прочности, жесткости и трещиностойкости бетонных и фибробетонных конструкций проводят согласно ГОСТ 8829-94.

9.4. Допустимое раскрытие трещин в конструкциях с комбинированным армированием устанавливается из условий сохранения несущей способности и сохранности арматуры в соответствии с СП 63.13330.2012.

10. ПРИМЕР РАСЧЕТА СОСТАВА МЕЛКОЗЕРНИСТОГО ФИБРОБЕТОНА

Пример 1: Требуется определить состав модифицированного мелкозернистого фибробетона для жесткого аэродромного покрытия, рассчитанного на внекатегорийную нагрузку, со следующими требованиями:

- класс по прочности при сжатии - В40;
- класс по прочности на растяжение при изгибе - B_{tb} 4,4;
- морозостойкость - 300 циклов;
- водонепроницаемость - $8 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$;
- подвижность - ПЗ (ОК=10-15 см) по ГОСТ 7473-2010;
- метод изготовления конструкции – подача смеси автобетононасосом и уплотнение глубинными вибраторами.

1. Определяем характеристики используемых материалов:

портландцемент М500 (нормальная густота 25 %; плотность $3,1 \text{ т/м}^3$; содержание $C_3A=7 \%$); микрокремнезем (истинная плотность $2,2 \text{ т/м}^3$; водопотребность $V_{МК}=85 \%$; содержание $SiO_2=93,8 \%$); песок кварцевый (модуль крупности $M_K=2,73$; плотность $2,626 \text{ т/м}^3$; водопотребность $V_{П}=6 \%$); гиперпластификатор Stachement 2061/151.2 (плотность $1,097 \text{ т/м}^3$; концентрация $K=30 \%$); полипропиленовая фибра (длина $L=18 \text{ мм}$; диаметр $D=20 \text{ мкм}$); вода $pH=6,9$.

2. Требуемые сопротивления бетона осевому сжатию R_b и растяжению при изгибе R_{tb} находим по формуле (1):

$$R_b = B \cdot K_T = 40 \cdot 1,28 = 51,2 \text{ МПа}$$

$$R_{tb} = B_{tb} \cdot K_T = 4,4 \cdot 1,28 = 5,632 \text{ МПа}$$

3. Определяем расчетную прочность бетона на растяжение при изгибе по формуле (2):

$$R_{tb}^{расч} = 0,08 \cdot (10 \cdot R_b)^{2/3} = 0,08 \cdot (10 \cdot 51,2)^{2/3} = 5,12 \text{ МПа}$$

В данном случае $R_{tb}^{расч} \leq R_{tb}$, следовательно производим расчет требуемого содержания фибры по формуле (3):

$$\Phi_{ПП} = \frac{R_{tb} - R_{tb}^{расч}}{K_{tb}} = \frac{5,632 - 5,12}{0,148} \approx 3,5 \text{ кг/м}^3$$

4. Принимаем максимальный расход цемента $C_{max} = 500 \text{ кг/м}^3$ для бетона класса до В40 в соответствии с п. 4.4. Рекомендаций.

5. Оптимальное количество микрокремнезема в составе вяжущего определяется по формуле (4):

$$MK = \left| \frac{125 - 2 \cdot R_b + 0,03 \cdot R_{II}}{C_{max}} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{125 - 2 \cdot 51,2 + 0,03 \cdot 60,88}{500} \right| \cdot 100\% \approx 5 \%$$

Определяем расход цемента в составе многокомпонентного вяжущего (МКВ) по формуле (5):

$$Ц = Ц_{\max} \cdot (1 - 0,01 \cdot МК) = 500 \cdot (1 - 0,01 \cdot 5) = 475 \text{ кг}$$

6. Определяем основные показатели многокомпонентного вяжущего по формулам (6), (7) и (8):

– Общая масса на 1 м³ бетона и фибробетона:

$$МКВ = Ц + 0,01 \cdot МК \cdot Ц_{\max} = 475 + 0,01 \cdot 5 \cdot 500 = 500 \text{ кг}$$

– Истинная плотность:

$$\rho_{МКВ} = \rho_{Ц} - 0,01 \cdot МК \cdot (\rho_{Ц} - \rho_{МК}) = 3,1 - 0,01 \cdot 5 \cdot (3,1 - 2,2) = 3,055 \text{ т/м}^3$$

– Активность (предел прочности при сжатии):

$$R_{МКВ} = R_{Ц} - 0,002 \cdot МК^3 + 0,019 \cdot МК^2 - 0,294 \cdot МК = 60,88 - 0,002 \cdot 5^3 + 0,019 \cdot 5^2 - 0,294 \cdot 5 = 59,64 \text{ МПа}$$

7. Определяем требуемое водовязущее отношение:

$$\left(\frac{B}{B}\right)_{TP} = \frac{0,386 \cdot R_{МКВ}}{R_b + 0,165 \cdot R_{МКВ}} = \frac{0,386 \cdot 59,64}{51,2 + 0,165 \cdot 59,64} = 0,377$$

8. Ориентировочный расход гиперпластификатора и коэффициент влияния добавки определяем по формуле (10) и таблице 3:

$$ГП = 10^{k_{\text{inf}}} = 10^{-0,075} = 0,84 \%$$

$$k_{\text{inf}} = \frac{0,37 - (B/B)_{TP}}{0,093} = \frac{0,37 - 0,377}{0,093} = -0,075$$

9. Требуемое количество воды затворения находим с учетом концентрации водного раствора химической добавки по формуле (11):

$$B_{TP} = МКВ \cdot \left(\left(\frac{B}{B}\right)_{TP} - ГП \cdot \left(\frac{1}{K} - 0,01\right) \right) = 500 \cdot \left(0,377 - 0,84 \cdot \left(\frac{1}{30} - 0,01\right) \right) = 178,7 \text{ л}$$

10. Определяем оптимальное соотношение между песком и вяжущим по формуле (12) и расход песка:

$$n = \rho_{П} \cdot \left(\left(\frac{1000 - 1,099 \cdot \Phi_{ПП} - 10 \cdot BB}{МКВ} \right) - \left(\frac{1}{\rho_{МКВ}} + \left(\frac{B}{B}\right)_{TP} + 0,01 \cdot \frac{ГП}{\rho_{ПП}} \right) \right) =$$

$$= 2,626 \cdot \left(\left(\frac{1000 - 1,099 \cdot 3,5 - 10 \cdot 2}{500} \right) - \left(\frac{1}{3,055} + 0,377 + 0,01 \cdot \frac{0,84}{1,426} \right) \right) = 3,26$$

$$П = МКВ \cdot n = 500 \cdot 3,26 = 1630 \text{ кг}$$

11. Расчетная плотность и выход фибробетонной смеси составят:

$$\rho_{fb} = 475 + 25 + 1630 + 4,2 + 188,5 + 3,5 = 2326,2 \text{ кг/м}^3$$

$$V_{fb} = 153,22 + 11,36 + 620,71 + 2,94 + 188,5 + 3,85 + 20 = 1000,0 \text{ л}$$

12. Находим значения структурных характеристик C и W по формулам (15) и (16):

– истинное водовяжущее отношение W :

$$W = \left(\frac{B - B_{3АП}}{МКВ} \right) = \left(\frac{188,5 - 97,8}{500} \right) = 0,181$$

Где $B_{3АП} = 0,01 \cdot МКВ \cdot n \cdot B_{II} = 0,01 \cdot 500 \cdot 3,26 \cdot 6 = 97,8 \text{ л}$

– объемная концентрация цементного теста с МК ($C_{МКВ}$):

$$C_{МКВ} = \frac{МКВ}{1000} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{МКВ}} + W \right) = \frac{500}{1000} \cdot \left(\frac{1}{3,055} + 0,181 \right) = 0,254$$

13. Находим прогнозируемое значение морозостойкости и водонепроницаемости модифицированного мелкозернистого фибробетона по формулам (17), (18) и (19):

$$F_1 = 500 + 9,2 \cdot МК + 70 \cdot ГП + 118,3 \cdot \Phi_{III} - 0,53 \cdot МК^2 - 276,7 \cdot ГП^2 - 50 \cdot \Phi_{III}^2 =$$

$$= 500 + 9,2 \cdot 5 + 70 \cdot 0,84 + 118,3 \cdot 3,5 - 0,53 \cdot 5^2 - 276,7 \cdot 0,84^2 - 50 \cdot 3,5^2 = 325 \text{ циклов}$$

$$F_2 = 440 + 15,8 \cdot МК + 35 \cdot ГП + 59,2 \cdot \Phi_{III} - 0,9 \cdot МК^2 - 138,4 \cdot ГП^2 - 25 \cdot \Phi_{III}^2 -$$

$$- 736,5 \cdot W + 455 \cdot C + 441,5 \cdot W^2 - 419 \cdot C^2 = 440 + 15,8 \cdot 5 + 35 \cdot 0,84 + 59,2 \cdot 3,5 - 0,9 \cdot 5^2 -$$

$$- 138,4 \cdot 0,84^2 - 25 \cdot 3,5^2 - 736,5 \cdot 0,181 + 455 \cdot 0,254 + 441,5 \cdot 0,181^2 - 419 \cdot 0,254^2 = 350 \text{ циклов}$$

$$W = 8,67 + 1,6 \cdot МК + 20 \cdot ГП + 4,7 \cdot \Phi_{III} - 0,08 \cdot МК^2 - 37,33 \cdot ГП^2 - 1,03 \cdot \Phi_{III}^2 =$$

$$= 8,67 + 1,6 \cdot 5 + 20 \cdot 0,84 + 4,7 \cdot 3,5 - 0,08 \cdot 5^2 - 37,33 \cdot 0,84^2 - 1,03 \cdot 3,5^2 = 9 \text{ МПа} \cdot 10^{-1}$$

14. Назначаем состав фибробетонной смеси ($V_{см} = 1 \text{ м}^3$):

- Цемент – 475 кг;
- Микрокремнезем – 25 кг (5 % от МКВ);
- Песок кварцевый – 1630 кг;
- Гиперпластификатор жидкий – 14 л (0,84 % от МКВ);
- Полипропиленовая фибра – 3,5 кг;
- Вода – 178,7 л.

Приложение 1

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПОТРЕБНОСТИ МЕЛКОГО ЗАПОЛНИТЕЛЯ И МИКРОНАПОЛНИТЕЛЯ В БЕТОНЕ

Определение водопотребности песка

Испытание песка проводится в соответствии с ГОСТ 8735-88* «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Для определения водопотребности песка предварительно устанавливают водоцементное отношение цементного теста $(B/C)_{ц}$, соответствующее его нормальной густоте. Для этого 900 граммов цемента смешивают с таким количеством воды, которое обеспечит на встряхивающем столике расплыв конуса 170 мм. Затем приготавливают раствор состава Ц:П = 1:2 на исследуемом песке и подбирают $(B/C)_p$, при котором раствор имеет такой же расплыв конуса. Для раствора дозируют 300 граммов цемента и 600 граммов песка, материалы в сухом виде предварительно смешивают, заливают требуемое количество воды затворения и перемешивают в течение 5 минут. Водопотребность песка $V_{п}$ (%) будет определяться по формуле:

$$V_{п} = \frac{(B/C)_p - (B/C)_{ц}}{2} \cdot 100$$

Водопотребность песка зависит от модуля крупности, поэтому ее можно определить по графику (рис. 1).

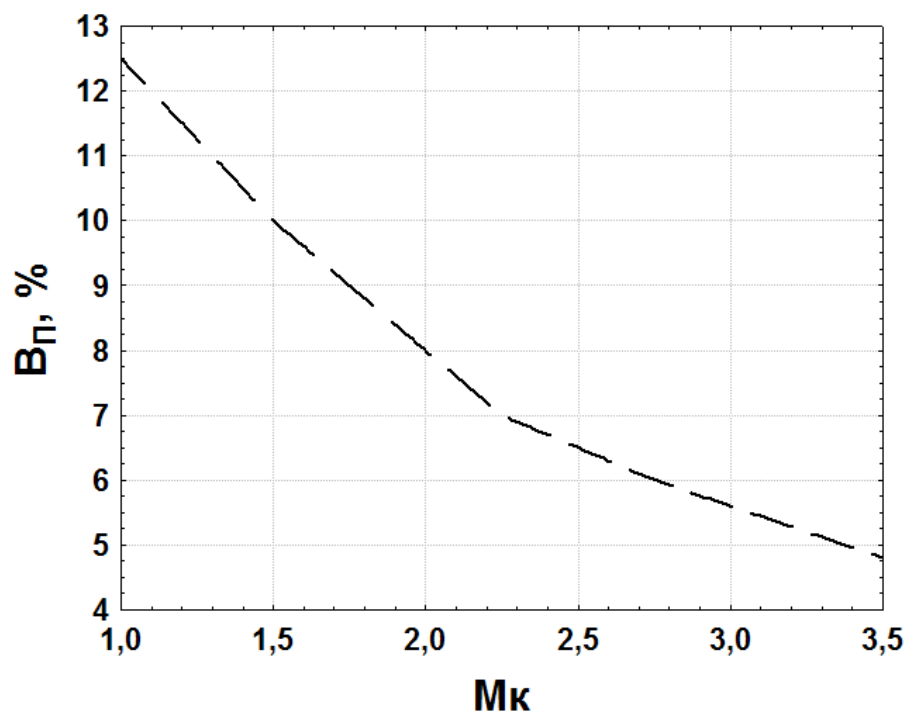


Рис.1. - График изменения водопотребности песка в зависимости от его модуля крупности

Определение водопотребности микрокремнезема

Водопотребность микрокремнезема по неизменности подвижности бетонной смеси определяют следующим способом: готовят контрольный состав смеси при соотношении Ц:П = 1:2 объемом 7 литров с таким количеством воды затворения V_1 , которое может обеспечить жесткость бетонной смеси 30 секунд или подвижность с осадкой конуса 1 см. Во втором составе производят замену 10 % цемента микрокремнеземом и контролируют равноподвижность смеси за счет увеличения расхода воды V_2 . В результате получаем систему уравнений:

$$\begin{cases} B_1 = 0,01 \cdot П \cdot B_{П} + Ц_1 \cdot W \\ B_2 = 0,01 \cdot (П \cdot B_{П} + МК \cdot B_{МК}) + Ц_2 \cdot W \end{cases}$$

где $П$, $МК$ и $Ц$ – расходы песка, микрокремнезема и цемента соответственно, кг; W – истинное водоцементное отношение; $B_{П}$ – водопотребность песка, %; $B_{МК}$ – водопотребность микрокремнезема, %.

В результате преобразования системы уравнений водопотребность микрокремнезема ($B_{МК}$) будет определяться по следующей формуле:

$$B_{МК} = \frac{B_2 - B_1 + (Ц_1 - Ц_2) \cdot W}{МК} \cdot 100\%$$

Приложение 2

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА

Испытание микрокремнезема проводится в соответствии с ТУ 5743-048-02495332-96 «Микрокремнезем конденсированный», ГОСТ 5382 – 91 «Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа».

Определение насыпной плотности

Насыпная плотность микрокремнезема сухих форм или водной суспензии (пасты) определяют путем взвешивания в отградуированных мерных емкостях объемом 10 л и вычисляют по формуле:

$$\rho_{МК}^{НАС} = \frac{m_1 - m}{0,01} ,$$

где m – масса пустой емкости, кг; m_1 – масса емкости с МК, кг.

Определение индекса активности

Индекс активности микрокремнезема определяют путем соотношения результатов испытаний на прочность при сжатии образцов с размерами 4x4x16 см с использованием 90% цемента и 10% микрокремнезема (к общей массе вяжущего) и стандартных цементных образцов, выполненных по ГОСТ 30744 – 2001 или ГОСТ 310.4 – 81*. Индекс активности (K) микрокремнезема конденсированного определяют по формуле:

$$K = \frac{R_{МКВ}}{R_{Ц}} \cdot 100\% ,$$

где $R_{МКВ}$ – прочность (активность) многокомпонентного вяжущего (90% цемента и 10% микрокремнезема), МПа; $R_{Ц}$ – прочность (активность) цемента, МПа.

Определение индекса активности следует производить с каждых 100 тонн микрокремнезема конденсированного, но не реже одного раза в два месяца.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ

1. Для того чтобы определить оптимальное количество активной минеральной добавки в составе вяжущего, необходимо получить математические зависимости активности цемента или прочности бетона от расхода тонкодисперсной добавки.

2. Для определения активности цемента в соответствии с ГОСТ 310.4-81* «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии» и ГОСТ 30744-2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка» изготавливаются образцы-балочки с размерами 4x4x16 см состава Ц:П=1:3. В качестве мелкого заполнителя необходимо использовать нормальный Вольский песок или песок по своим характеристикам отвечающий ГОСТ 6139-2003 «Песок для испытаний цемента. Технические условия». Активность многокомпонентного вяжущего следует определять при изменении расхода добавки в пределах от 2 до 16 % от общей массы вяжущего.

3. Для мелкозернистого бетона необходимо подобрать состав в соответствии с методикой приведенной в 5-й главе настоящих рекомендаций. Образцы бетона с разным расходом минеральной добавки изготавливаются и испытываются согласно ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности» и ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

По полученным данным строится график и вычисляется уравнение активности многокомпонентного вяжущего в зависимости от расхода добавки. Данный эталонный график применим только для цемента, на котором проводились исследования. При использовании цемента с другими свойствами (активность, нормальная плотность и т.д.), микрокремнезема с измененной удельной поверхностью и песка с другим химическим составом необходимо строить эталонную кривую заново.

4. График (рис. 2) построен для следующих материалов:

- портландцемент - активность 60,52 МПа, $НГ=25\%$;
- микрокремнезем конденсированный уплотненный МКУ - 85 - водопотребность $V_{МК}=85\%$; содержание $SiO_2=93,8\%$;
- кварцевый песок $\rho_{нас}=1620\text{ кг/м}^3$, $\rho_{ист}=2626\text{ кг/м}^3$, пустотность $П=38,3\%$, модуль крупности $M_K=2,73$, водопотребность $V_{П}=6\%$;

Активность (прочность) многокомпонентного вяжущего будет определяться по формуле:

$$R_{МКВ} = R_{Ц} - 0,002 \cdot МК^3 + 0,019 \cdot МК^2 - 0,294 \cdot МК$$

где $R_{Ц}$ – активность цемента, МПа; МК – расход микрокремнезема, % от общей массы вяжущего.

Оптимальное количество активной минеральной добавки определяется в таком интервале, при котором процент замещения цемента добавкой больше, чем процент снижения прочности вяжущего.

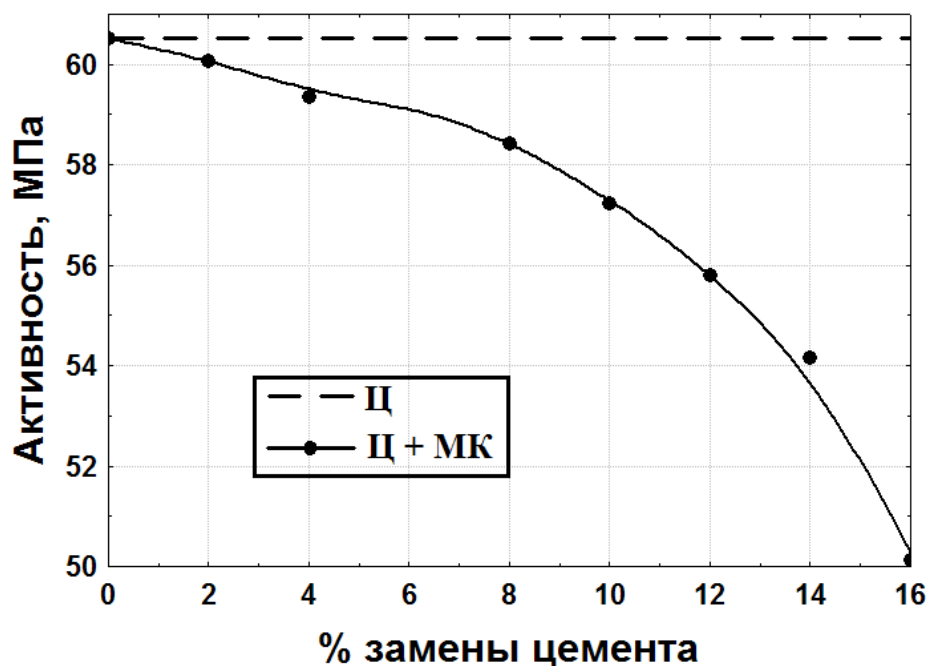


Рис.2. - Зависимость активности вяжущего от расхода добавки

Приложение 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БЕТОННЫХ И ФИБРОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

Определение объема вовлеченного воздуха в подвижных и литых смесях

Измерение объема вовлеченного воздуха в готовых бетонных и фибробетонных смесях проводится поромером Testing 1.0335 (рис. 3). Данный прибор соответствует нормам DIN 1048, EN 12350-7, ASTM C 231, BS 1881 и имеет габариты с тарой 400 x 400 x 800 мм. Объем емкости для образца - 8 л. Манометр имеет класс точности 1,0.



Рис. 3. - Общий вид поромера Testing 1.0335

Прибор представляет собой герметично закрывающийся металлический сосуд объемом 8 литров. В верхней съемной части расположен манометр, клапаны и вакуумный насос. Принцип работы основан на методе выравнивания давлений. Испытательный прибор Testing 1.0335 имеет напорную камеру, в которой создается заданное давление ручным механическим насосом. При

открытии перепускного клапана происходит выравнивание давления с емкостью образца, которая заполнена бетонной смесью. Падение давления используется для определения содержания воздуха в смеси.

Порядок проведения испытания

1. Снять измерительную головку прибора (напорная камера с манометром). На емкость для бетона закрепить насадку – кольцо;
2. Заполнить емкость готовой фибробетонной (бетонной) смесью выше верхнего края и уплотнить ее (штыковкой или на вибрационном столике);
3. Снять насадку – кольцо и стальной линейкой убрать излишний бетон, выравнивая его по уровню верхнего края емкости;
4. Очистить край емкости влажной тряпкой или губкой;
5. Поставить измерительную головку прибора, соблюдая при этом совпадение красных маркировок (точек) емкости, и герметично прикрепить попарно диагонально лежащие зажимные крепления;
6. Открыть клапаны (положение наверх);
7. Через левый клапан заполнять прибор водой с помощью брызгалки до тех пор, пока весь воздух не выйдет через противоположный клапан. Для этого следует держать прибор в легко наклоненном положении налево, таким образом, чтобы правый клапан стоял вертикально. Отсутствие пузырьков воздуха в вытекаемой воде означает полное удаление воздуха из прибора;
8. Закрывать оба клапана;
9. Открыть перепускной вентиль и выровнять давление в головке и емкости и качать, пока стрелка манометра не установится в 10 мм за «красной регулировочной отметкой», затем точно установить стрелку сбрасыванием давления перепускным клапаном;
10. Ручным насосом создать требуемое давление и нажать кнопку TEST;
11. Отсчитать показания содержания воздуха фибробетонной смеси по показанию манометра в процентах;
12. После проведения испытания медленно открыть оба клапана, чтобы сбросить давление в сосуде;
13. Открыть перепускной вентиль путем нажатия кнопки TEST и сбросить остаточное давление в измерительной головке и сосуде. При этом стрелка манометра медленно возвращается в исходное положение.

Исследование однородности фибробетонных смесей

Исследование однородности и расслаиваемости фибробетонной смеси производится по ОДМ 218.2.014-2011 и РТМ-17-03-2005.

Минимальный объем пробы $V_{пр}$ для контрольных испытаний фибробетонной смеси с целью определения однородности смеси, равномерного распределения фибр в ее объеме и показателя расслаиваемости устанавливаются в зависимости от геометрических параметров используемых фибр и объемного их содержания. При отборе проб должно соблюдаться условие:

$$\sqrt[3]{V_{пр}} \geq 2,5 \cdot l_f,$$

где l_f – длина фибры, мм.

Для проверки и контроля однородности смеси (равномерности распределения фибр в ее объеме) на стадии подбора состава из различных частей замеса отбирают не менее 10 проб с последующей их отмывкой и определением количества фибры в каждой пробе. Отмывку фибр, их высушивание и взвешивание принимают по аналогии с методикой ГОСТ 10181-2000 (п.7). Коэффициент однородности фибробетонной смеси K_o будет определяться по формуле:

$$K_o = \frac{m_{f,p}}{m_f},$$

где $m_{f,p}$, m_f - регламентируемая и фактическая масса фибры в каждой части куба, кг.

Значение коэффициента однородности (равномерности распределения фибры) для каждой из проб должно быть в пределах: $1,1 \geq K_o \geq 0,9$.

Исследование расслаиваемости фибробетонных смесей

Расслаиваемость фибробетонной смеси определяют также по аналогии с методикой ГОСТ 10181-2000 (п. 7), расслаиваемость фибр – по коэффициенту распределения фибр – K_p .

Для определения K_p из смеси изготавливают куб со стороной ребра 15 см. До момента схватывания уплотненного бетона форма с образцами раскрывается. С помощью ножа куб разделяется на две равные части – верхнюю и нижнюю. Каждая из частей отмывается, извлекаются фибры и взвешиваются. Коэффициент расслаиваемости K_p определяют по формуле:

$$K_p = \frac{P_{общ}}{2 \cdot P_{ниж}},$$

где $P_{общ}$ - общая масса фибры в образце, кг; $P_{ниж}$ - масса фибры в нижней половине образца, кг.

Критерием отсутствия расслаиваемости фибры по объему смеси является значение коэффициента K_p более 0,85.

Приложение 5

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОПОГЛОЩЕНИЯ БЕТОНОВ И ФИБРОБЕТОНОВ

Водопоглощение бетона и фибробетона определяют согласно ГОСТ 12730.3-78 (1994) испытанием стандартных образцов после 28 суток твердения. Поверхность образцов очищают от пыли, грязи и следов смазки с помощью проволочной щетки или абразивного камня.

Испытание образцов проводят в состоянии естественной влажности или высушенных до постоянной массы. Затем образцы помещают в емкость с водой, уровень которой выше уложенных образцов на 50 мм. Образцы укладывают на прокладки так, чтобы высота образца была минимальной (призмы и цилиндры укладывают на бок).

Температура воды в емкости должна быть (20 ± 2) °С.

Образцы взвешивают через каждые 24 ч водопоглощения на обычных или гидростатических весах с погрешностью не более 0,1 %.

При взвешивании на обычных весах образцы, вынутые из воды, предварительно вытирают отжатой влажной тканью. Массу воды, вытекшую из пор образца на чашку весов, следует включать в массу насыщенного образца. Испытание проводят до тех пор, пока результаты двух последовательных взвешиваний будут отличаться не более чем на 0,1 %.

Водопоглощение отдельного образца бетона по массе W_m в процентах определяют с погрешностью до 0,1 % по формуле:

$$W_m = \frac{m_c - m_b}{m_c} \cdot 100\%$$

где m_c , m_b - масса сухого и водонасыщенного образцов, г.

Водопоглощение отдельного образца бетона по объему W_o в процентах определяют с погрешностью до 0,1 % по формуле:

$$W_o = \frac{W_m \cdot \rho_c}{\rho_b}$$

где ρ_c , ρ_b - плотность сухого бетона и воды, кг/м³;

Водопоглощение бетона серий образцов определяют как среднее арифметическое значение результатов испытаний отдельных образцов в серии.

Приложение 6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМОСТИ БЕТОНОВ И ФИБРОБЕТОНОВ

Определение водонепроницаемости бетона и фибробетона производилось на основе экспресс-метода оценки его воздухонепроницаемости по ГОСТ 12730.5-84 с помощью прибора Агама – 2Р по результатам испытаний серии из шести образцов - кубов с ребром 150 мм. Принцип работы прибора заключается в измерении времени прохождения через образец единицы объема газа (с/см³), после проведения испытания используя переводную таблицу рассчитывается класс бетона по водонепроницаемости. Конструкция прибора АГАМА-2Р представлена на рисунках 4 и 5.

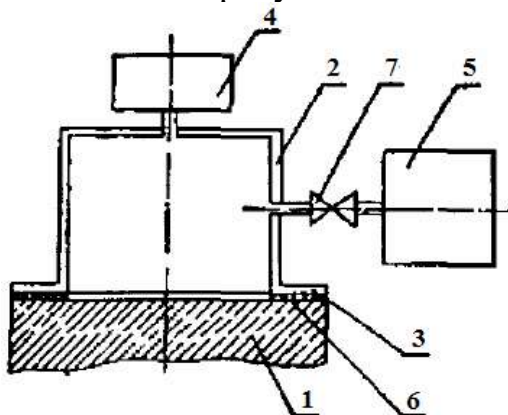


Рис. 4 - Конструкция прибора АГАМА-2Р

1 – бетонный образец, 2 – камера устройства, 3 – фланец камеры, 4 – вакуумметрический датчик, 5 – вакуум-насос, 6 – герметизирующая мастика, 7 – вентиль

Образцы должны твердеть в одинаковых условиях с конструкциями, имеющими бетон аналогичного состава и возраста. Испытания проводят при температуре воздуха от +1 до +40 °С. Перед проведением испытаний образцы должны быть подсушены в течение 2-х суток, а их торцевые поверхности - очищены от поверхностной пленки цементного камня.

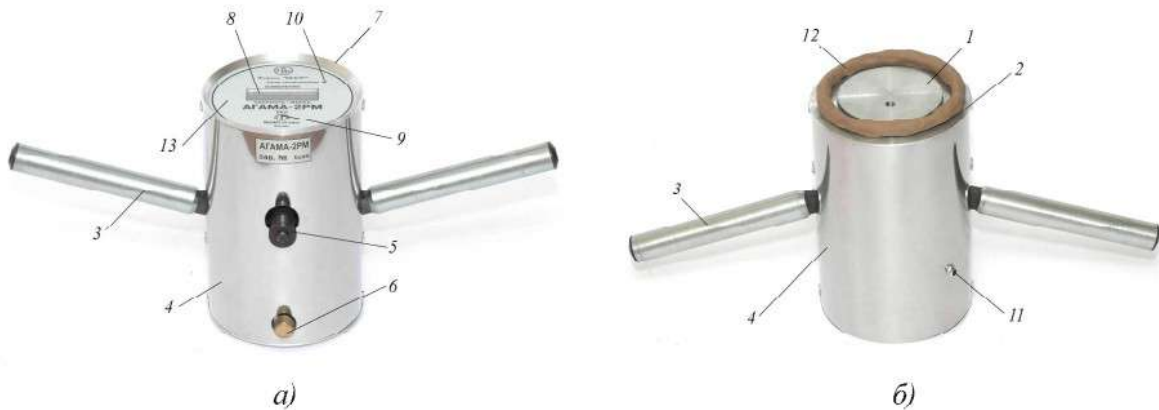


Рис. 5. - Прибор Агама – 2Р: а) вид сверху; б) вид снизу.

Порядок проведения испытания

1) Подключить прибор к сети 220 В и включить кнопку 9, расположенную на лицевой панели;

2) Отвернуть фиксатор против часовой стрелки на 5-6 оборотов и перевести рукоятки в верхнее положение так, чтобы торец поршня выступал над поверхностью фланца камеры на 3-5 мм;

3) Приготовить из герметизирующей мастики, входящей в комплект поставки, жгут диаметром 6-9 мм, уложить жгут по средней линии фланца камеры и соединить его концы, удалив излишки. Не допускается касание жгутом поршня;

4) Закрывать клапан давления 6, вращая колпачок до упора и фиксатор 5, и установить прибор выступающим торцом поршня на поверхность испытываемого материала;

5) Плавно нажать на рукоятки 3, опустив их в нижнее рабочее положение. Оставить прибор на поверхности материала, отпустив ручки механизма. По мере поступления воздуха из окружающей среды через испытуемый материал в полость камеры, столбик индикации оставшегося времени измерения в нижней строчке индикатора перемещается вправо. Одновременно, справа от столбика, выводится числовое значение оставшегося времени в процентах. За 100% берётся время окончания процесса измерения;

6) По окончании измерения на индикаторе устанавливается два значения. В верхней строчке выводится значение сопротивления проникновению воздуха через материал в с/см^3 , а в нижней - марка бетона по водонепроницаемости;

7) Выключить прибор нажатием и удержанием (более 3 секунд) кнопки на лицевой панели прибора;

8) Снять прибор с поверхности испытываемого материала. Для этого отвернуть колпачок клапана давления, после чего отвернуть фиксатор против часовой стрелки на 5...6 оборотов. Далее плавно переместить рукоятки в верхнее положение. Снять прибор за рукоятки, установить его блендой вниз, мастерком очистить рабочую поверхность фланца от мастики;

9) Герметизирующую мастику можно использовать многократно, предварительно удаляя из нее инородные включения;

10) По таблице 8 или по установленной градуировочной зависимости

определяют марку бетона по водонепроницаемости (W), соответствующую полученному значению a_c или m_c .

Таблица 8

**Градуировочная таблица для определения
водонепроницаемости бетона**

Параметр воздухонепроницаемости бетона a_c , $\text{см}^3/\text{с}$	Сопротивление бетона прониканию воздуха, m_c , $\text{с}/\text{см}^3$	Марка бетона по водонепроницаемости W, $\text{МПа}\cdot 10^{-1}$
0,325 – 0,224	3,1 – 4,5	2
0,223 – 0,154	4,6 – 6,5	4
0,153 – 0,106	6,6 – 9,4	6
0,0105 – 0,0728	9,5 – 13,7	8
0,0727 – 0,0510	13,8 – 19,6	10
0,0509 – 0,0345	19,7 – 29,0	12
0,0237 – 0,0164	42,1 – 60,9	16
0,0163 – 0,0113	61,0 – 88,5	18
0,0112 – 0,0077	88,6 – 130,2	20

Приложение 7

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОРОЗОСТОЙКОСТИ
БЕТОНОВ И ФИБРОБЕТОНОВ**

Морозостойкость бетона и фибробетона определяется по ГОСТ 10060 – 2012 по базовому методу с помощью дисплейной морозильной камеры Derby ЕК-36 Х путем замораживания-оттаивания и испытания на прочность при сжатии образцов - кубов с ребром 100 мм. Характеристики морозильной камеры представлены в таблице 9.

Таблица 9

Характеристики морозильной камеры Derby ЕК-36 Х

Температурный режим	от -22 до -11°С
Объем	317 л
Крышка	прозрачная
Напряжение	220 В
Потребляемая мощность	0,155 кВт/ч
Ширина	1040 мм
Глубина	650 мм
Высота	895 мм
Вес (без упаковки)	52,5 кг

Образцы для определения морозостойкости бетона не должны иметь внешних дефектов. Разброс значений плотности отдельных образцов в серии до их насыщения не должен превышать $30 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Массу образцов определяют с погрешностью не более 0,1%. Контрольные образцы бетона перед испытанием на прочность, а основные образцы перед замораживанием насыщают водой или 5 %-ным водным раствором хлорида

натрия температурой (20 ± 2) °С с погружением на 1/3 их высоты на 24 ч, затем уровень повышают до 2/3 высоты образцов и выдерживают в таком состоянии еще 24 ч, после чего образцы полностью погружают в воду или раствор на 48 ч так, чтобы уровень жидкости был выше образцов не менее чем на 20 мм.

Число циклов испытания основных образцов бетона в течение одних суток должно быть не менее 1. Испытания следует вести непрерывно и в следующем порядке: образцы помещаются в морозильную камеру и замораживаются до -18°C , затем оттаиваются. Воду в ванне для оттаивания образцов меняют через каждые 100 циклов. При вынужденных перерывах в испытании образцы должны храниться в замороженном состоянии в морозильной камере. Режимы замораживания - оттаивания следует проводить в соответствии с таблицей 10.

Таблица 10

Режимы испытаний образцов

Размер образца, мм	Режим испытаний			
	замораживание		оттаивание	
	время, ч не менее	температура, °С	время, ч не менее	температура, °С
100 x 100 x 100	2,5	-18 ± 2	$2 \pm 0,5$	$+20 \pm 2$

После определенного количества циклов производятся промежуточные испытания кубиков на прочность, и затем испытания продолжаются до того момента, пока не произойдет потеря прочности ниже расчетной.

Марку бетона по морозостойкости принимают по таблице 4 ГОСТ 10060-2012 с учетом числа циклов, при котором уменьшение массы образцов не превышает 2 % и на них отсутствуют трещины, сколы, шелушение ребер. Для бетона, к поверхности которого предъявляют требования по декоративности, и для бетона покрытий автомобильных дорог и аэродромов шелушение поверхности образцов не допускается.

Приложение 8

РЕКОМЕНДУЕМАЯ УДОБОУКЛАДЫВАЕМОСТЬ СМЕСИ

Марка смеси	Вид изделия и методы изготовления		Удобоукладываемость	
	монолитные	сборные	осадка конуса, см	жесткость, сек
Ж4	-	Вибропрокат, роликное прессование, формование с немедленной распалубкой	0	31 и более
Ж2, Ж3	Подготовка под фундаменты и основания дорог и полов	Кольца, блоки щелевые, элементы перекрытий, бордюрные камни, формуемые роликным формованием, на виброплощадках	0	21 - 30
Ж1, Ж2	Массивные неармированные и	Колонны, сваи, балки, плиты, лестничные марши,	0	5 - 10

Марка смеси	Вид изделия и методы изготовления		Удобоукладываемость	
	монолитные	сборные	осадка конуса, см	жесткость, сек
	слабоармированные конструкции	фермы, трубы, формуемые на виброплощадке		
П1, П2	Плиты, балки, колонны различных сечений, конструкции, бетонируемые под водой	Тонкостенные густоармированные конструкции, формуемые на виброплощадках или в кассетных установках	1 - 9	4 и менее
П3, П4	Тонкостенные густоармированные конструкции и элементы мостов	-	10 и более	-
П5	Конструкции с закладными деталями и арматурой, швы и пазухи	-	20 - 24	-

Приложение 9

ТРЕБОВАНИЯ К МИНИМАЛЬНОМУ РАСХОДУ ЦЕМЕНТА
Минимальный расход цемента в бетонах, эксплуатируемых
в неагрессивных средах

Вид конструкции	Условия эксплуатации	Вид и расход цементов, кг/м ³		
		ПЦ-Д0, ПЦ-Д5 ССПЦ-Д0 ЦЕМ I	ПЦ-Д20 ССПЦ-Д20 ЦЕМ II	ШПЦ, ССШПЦ ПуццПЦ ЦЕМ III ЦЕМ IX
Неармированные	Без атмосферных воздействий	Не нормируется		
	При атмосферных воздействиях	150	170	170
Армированные с ненапрягаемой арматурой	Без атмосферных воздействий	150	170	180
	При атмосферных воздействиях	200	220	240
Армированные с преднапряженной арматурой	Без атмосферных воздействий	220	240	270
	При атмосферных воздействиях	240	270	300

**Минимальный расход цемента и граничные условия по составу бетонов,
эксплуатируемых в агрессивных средах**

№ п/п	Показатели	Среда эксплуатации				
		ХО	ХС	XS и XD	XF	ХА
1	Минимальный расход цемента, кг/м ³	прил. 9	260-280	300-340	300-340	300-360
2	Воздухосодержание, %	-	-	-	6,0±2,0	-
3	Максимальное В/Ц	-	0,50-0,65	0,45-0,55	0,45-0,55	0,45-0,55
4	Минимальный класс прочности на сжатие	B15	B25-B37	B30-B45	B37	B37-B45

* Среды эксплуатации приведены по ГОСТ 25192-2012.

Приложение 10

Рациональные марки цемента для бетона различных классов

Проектный класс бетона по прочности на сжатие*	Рекомендуемые и допускаемые марки цемента для мелкозернистого бетона при твердении в условиях					
	естественных		тепловой обработки при отпускной прочности бетона, % проектной			
	рекомендуемые	допускаемые	70 и менее		80 и более	
			рекомендуемые	допускаемые	рекомендуемые	допускаемые
B7,5	300	-	300	-	-	-
B10	300	400	300	400	400	300
B12,5	300	400	300	400	400	300; 500
B15	400	300; 500	400	300; 500	400	300; 500
B20	400	300; 500	400	300; 500	400	300; 500
B22,5	400	500	400	500	500	400
B25	400	500	400	500	500	400
B30	500	400; 550	500	400; 550	500	400; 550
B35	500	550	500	550	500	550
B40	500	550	500	550	550	-
B45	550	-	550	-	-	-

**СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ КЛАССАМИ БЕТОНА ПО
ПРОЧНОСТИ НА СЖАТИЕ И РАСТЯЖЕНИЕ И МАРКАМИ**

Класс бетона по прочности	Средняя прочность бетона (\bar{R})*, кгс/см ²	Ближайшая марка бетона по прочности М	Отклонение ближайшей марки бетона от средней прочности класса, %, $\frac{M - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100$
Сжатие			
B3,5	45,8	M50	+9,2
B5	65,5	M75	+14,5
B7,5	98,2	M100	+1,8
B10	131,0	M150	+14,5
B12,5	163,7	M150	-8,4
B15	196,5	M200	+1,8
B20	261,9	M250	-4,5
B22,5	294,7	M300	+1,8
B25	327,4	M350	+6,9
B27,5	360,2	M350	-2,8
B30	392,9	M400	+1,8
B35	458,4	M450	-1,8
B40	523,9	M550	+5,0
B45	589,4	M600	+1,8
B50	654,8	M700	+6,9
B55	720,3	M700	-2,8
B60	785,8	M800	+1,8
B65	851,3	M900	+5,7
B70	916,8	M900	-1,8
B75	982,3	M1000	+1,8
B80	1047,7	M1000	-4,6
Осевое растяжение			
B _t 0,4	5,2	P _t 5	-3,8
B _t 0,8	10,5	P _t 10	-4,8
B _t 1,2	15,7	P _t 15	-4,5
B _t 1,6	21,0	P _t 20	-4,8
B _t 2,0	26,2	P _t 25	-4,6
B _t 2,4	31,4	P _t 30	-4,5
B _t 2,8	36,7	P _t 35	-4,6
B _t 3,2	41,9	P _t 40	-4,5
B _t 3,6	47,1	P _t 45	-4,5
B _t 4,0	52,4	P _t 50	-4,6
Растяжение при изгибе			
B _{tb} 0,4	5,2	P _{tb} 5	-3,8

Класс бетона по прочности	Средняя прочность бетона (\bar{R})*, кгс/см ²	Ближайшая марка бетона по прочности М	Отклонение ближайшей марки бетона от средней прочности класса, %, $\frac{M - \bar{R}}{\bar{R}} \cdot 100$
V _{tb} 0,8	10,5	P _{tb} 10	-4,8
V _{tb} 1,2	15,7	P _{tb} 15	-4,5
V _{tb} 1,6	21,0	P _{tb} 20	-4,8
V _{tb} 2,0	26,2	P _{tb} 25	-4,6
V _{tb} 2,4	31,4	P _{tb} 30	-4,5
V _{tb} 2,8	36,7	P _{tb} 35	-4,6
V _{tb} 3,2	41,9	P _{tb} 40	-4,5
V _{tb} 3,6	47,1	P _{tb} 45	-4,5
V _{tb} 4,0	52,4	P _{tb} 50	-4,6
V _{tb} 4,4	57,6	P _{tb} 55	+4,2
V _{tb} 4,8	62,9	P _{tb} 60	+3,3
V _{tb} 5,2	68,1	P _{tb} 65	+2,8
V _{tb} 5,6	73,3	P _{tb} 70	+2,3
V _{tb} 6,0	78,6	P _{tb} 75	+1,8
V _{tb} 6,4	83,8	P _{tb} 80	+1,4
V _{tb} 6,8	89,1	P _{tb} 85	+1,0
V _{tb} 7,2	94,3	P _{tb} 90	-4,6
V _{tb} 8,0	104,8	P _{tb} 100	-4,6

* Средняя прочность бетона R рассчитана при коэффициенте вариации V , равном 13,5 %, и обеспеченности 95 % для всех видов бетонов, а для массивных гидротехнических конструкций при коэффициенте вариации V , равном 17 %, и обеспеченности 90%.

Приложение 12

ГИПЕРПЛАСТИФИКАТОРЫ И ОСОБЕННОСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ DIAMOND CONCRETE (DC)

DC - модифицированная добавка для бетона на основе эфира поликарбоксилата, допированная углеродными нанотрубками.

Технические данные

Наименование свойства	Значение
Внешний вид	вязкая жидкость черного цвета
Плотность при 20°C	1080 ± 12 кг/м ³
pH	8,0±0,5
Концентрация, %	от 10 до 40
Дозировка	0,2÷2,0 % от массы вяжущего

Суперпластификатор может быть применен при строительстве жилых, производственных зданий, их внутренней и наружной отделки, заливки напольного покрытия и стяжек, при приготовлении кладочных растворов, штукатурных смесей и изготовления сборных железобетонных конструкций. Пластификатор DC-5 совместим с любыми типами добавок, в том числе с суперпластификаторами на основе полинафталинсульфонатов.

STACHEMENT

Stachement 2061/151.2, 2597/151.2C – полифункциональные добавки для производства товарного высокопрочного бетона на основе поликарбоксилатов и замедлителя, произведенная в соответствии с EN 934-2:2001. В ее состав входят: вода – 70%, поликарбоксилатер – 18%, глюконат натриевый – 12%.

Отличается высоким пластифицирующим эффектом, быстрым ростом первоначальной прочности и долгим сроком сохранения подвижности бетона без замедления схватывания и твердения. В летних условиях производства добавка позволяет исключить термообработку полностью, в зимних условиях - максимально ее сокращает.

Технические данные

Наименование свойства	Значение
Внешний вид	жидкость темно-коричневого цвета
Плотность при 20°C	1097 ± 10 кг/м ³
pH	7,0±1,0
Концентрация, %	30 ± 1,5 %
Дозировка	0,1÷1,5 % от массы вяжущего

Зависимость плотности добавки от температуры

Температура, С ⁰		5	10	15	20	25	30	35
Плотность ρ _{гп} , кг/м ³	2061/151.2	1102	1100	1099	1097	1095	1093	1091
	2597/151.2C	1097	1095	1093	1092	1090	1089	1085

Рекомендуемая дозировка для подвижных и литых смесей:

- 0,25 - 0,50 % от массы цемента для бетонов В25 - В35 П4,П5;
- 0,60 - 0,90 % от массы цемента для бетонов В40 - В70 П4, П5;
- 0,90 - 1,50 % от массы цемента для самоуплотняющихся бетонов.

ХИДЕТАЛ-ГП

Хидетал-ГП - комплексная добавка на основе водного раствора эфиров поликарбоксилатов, допированный углеродными нанотрубками, произведенная по ТУ 5745-019-57330160-12.

Рекомендуется для товарных бетонов, применяемых в сфере дорожной инфраструктуры, и для зимнего бетонирования конструкций. Снижает водоотделение и расслоение на высокоподвижных смесях, значительно уменьшает время вибрирования изделий, облегчает уплотнение бетона. В комплексе с дополнительными мероприятиями позволяет существенно повысить качество поверхности.

Технические данные

Наименование свойства	Значение
Внешний вид	жидкость светло-желтого цвета
Плотность при 20°C	1075 ± 30 кг/м ³
pH	6,5±1,5
Концентрация, %	10 ± 1,0 %
Дозировка	0,4÷1,6 % от массы вяжущего

GLENIUM

Суперпластификатор Glenium и его разновидности (G51,G115, ACE430, SKY501 и др.) представляет собой водный раствор поликарбоксилатного эфира (с нитратом кальция для зимнего бетонирования конструкций) и является универсальной добавкой, которая может применяться как для производства товарных бетонов различных классов, так и для производства железобетонных изделий и предварительно напряженных конструкций.

Технические данные

Наименование свойства	Значение
Внешний вид	жидкость светло-коричневого цвета
Плотность при 20°C	1100 ± 20 кг/м ³
pH	7,0±1,0
Концентрация, %	35 ± 1,8 %
Дозировка	0,1÷3,0 % от массы вяжущего

MELFLUX

Melflux – высокоэффективная добавка полифункционального действия, выпускаемая в виде порошка светло-коричневого цвета. Разновидности добавки (PP 100 F, 1641 F, 2651 F, 5581 F) обладают эффектом замедления схватывания цемента. Для Melflux 6681 F характерно содержание определенных боковых цепей на основе полиэтиленгликоля. Продукт может иметь окраску от почти бесцветной или желтоватой до коричневатой в связи с тем, что исходным компонентом является полиэтиленгликоль, а также вследствие характера радикальной полимеризации и состава. Melflux 5581 F – производится на основе поликарбоксилата, модифицированного диоксидом кремния.

Добавка успешно зарекомендовала себя при производстве сухих строительных смесей, а также высококачественных бетонов.

Технические данные

Наименование свойства	Значение
Внешний вид	желтый порошок, свободно сыпучий
pH	7,0±1,0
Дозировка	0,05÷1,5 % от массы вяжущего

FOX

FOX TM-8H – это гиперпластификатор для высококачественных, высокопрочных, самоуплотняющихся бетонов и для самовыравнивающихся смесей.

Технические данные

Характеристика	FOX TM-8H (20%)	FOX TM-8H (40%)	FOX TM-8H (Pwd)
Внешний вид	вязкая коричневая жидкость		желтый порошок
Плотность, кг/м ³	1050 ±20	1120±20	510±10
pH	9,0±0,5	9,0±0,5	9,0±0,5
Сухой остаток, %	20,0±1,0	40,0±2,0	98,0±1,0
Cl-, %	<0,10	<0,10	<0,10
Na ₂ SO ₄ , %	<4,0	<4,0	<4,0
Na ₂ O + 0,658 K ₂ O,%	<5,0	<5,0	<5,0
Дозировка %	0,8÷1,1	0,4÷0,6	0,1÷0,3
Расплав цементной пасты, мм	>240	>240	>240
Водоредуцирующий эффект, %	>20	>20	>20

Добавка эффективна и в составах на основе шлакопортландцемента или содержащих большое количество золы-уноса. FOX TM-8H наиболее эффективен при введении после добавления воды затворения.

С-3

Суперпластификатор С-3 - один из первых отечественных пластификаторов бетона на основе продуктов конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида, с молекулярно-массовым распределением. СП С-3 рекомендуется применять при возведении всех видов конструкций из монолитного тяжелого бетона классов по прочности на сжатие В20 и выше; при изготовлении всех видов сборных железобетонных конструкций и бетонных изделий из тяжелого бетона; при возведении всех видов конструкций из монолитного мелкозернистого бетона классов по прочности В10 (М150) и выше; при изготовлении всех видов сборных железобетонных конструкций и бетонных изделий на пористых заполнителях классов по прочности на сжатие В7,5 (М100) и выше; при необходимости изготовления бетонных смесей с применением нестандартных заполнителей, в том числе мелких песков; при возведении монолитных конструкций с применением напрягающего цемента или при использовании минеральных расширяющих добавок; при возведении монолитных конструкций, изготовлении сборных железобетонных изделий из жаростойкого бетона на портландцементе, шлакопортландцементе и глиноземистом цементе.

Технические данные

Характеристика	С-3	
Внешний вид	жидкость темно-коричневого цвета	светло-коричневый порошок
Массовая доля воды, %	до 68	до 10
Плотность, кг/м ³	1170 ±20	500±10
pH	8,0±1,0	8,0±1,0

Расход добавки в перерасчете на сухое вещество:

- 0,2 ÷ 1,2 % от массы цемента для монолитного бетона;
- 0,3 ÷ 0,7 % - от массы цемента для пропариваемых бетонов.

Зависимость плотности раствора добавки от концентрации

Концентрация раствора, %	Плотность раствора добавки, кг/м ³	Содержание сухого пластификатора, г/л
2	1008	20,2
5	1023	51,2
7	1033	72,3
10	1049	104,9
12	1059	127,0
15	1074	161,1
20	1099	219,8
25	1125	281,1
30	1150	344,9
33	1165	384,4
35	1175	411,3
37	1185	438,5
40	1200	480,2

SIKA

Sika - суперпластификаторы для высококачественных бетона на основе поликарбоксилатов и лигносульфонатов. Разновидности Sika (ViscoCrete, Paver HC-1 и Aer) применяются для улучшения удобоукладываемости, повышения степени уплотнения бетона и морозостойкости соответственно. Все суперпластификаторы Sika имеют хорошую совместимость с другими полифункциональными добавками.

Технические данные

Характеристика	Sika		
	Paver HC-1	Aer	ViscoCrete
Внешний вид	вязкая коричневая жидкость	желтая жидкость	светло - коричневая жидкость
Плотность, кг/м ³	1010 ± 10	1010 ± 20	1080 ± 20
pH	7,0±1,0	8,0±1,0	4,5±0,5
Концентрация, %	38,0±1,5	38,0±1,9	36,0±1,5
Дозировка, %	0,2÷0,5	0,01÷0,15	0,2÷1,6

FREM GIPER

FREM GIPER - гиперпластификатор нового поколения на основе поликарбоксилатов. По эффективности пластифицирующего действия относится к пластифицирующим добавкам I группы. Разновидности FREM GIPER (Spm-20, Spm Extra) – эффективные противоморозные добавки, SBI применяется для производства сборного железобетона.

Технические данные

Характеристика	FREM GIPER		
	Spm	Spm EXTRA	SBI
Внешний вид	прозрачная жидкость	желтая жидкость	прозрачная жидкость
Плотность, кг/м ³	1200 ± 30	1250 ± 30	1030 ± 30
pH	4,0±0,5	4,0±0,5	7,0±0,5
Концентрация, %	38,0±2,0	40,0±2,0	20,0±2,0
Дозировка, % (в жидком виде)	0,7÷1,6	1,0÷2,0	0,5÷1,5

Приложение 13

ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ВОЛОКОН ДЛЯ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ И ИХ СВОЙСТВА

ПОЛИПРОПИЛЕНОВАЯ ФИБРА (I)

Полипропиленовое волокно получают из гранул высокомолекулярного термопластичного полимера путем экструзии и последующей структурной модификации (вытяжки). Исходный материал – чистый полипропилен, состоящий из изотактической (95 ÷ 98 %) и атактической (5 ÷ 2 %) фракций. Готовые волокна обрабатываются специальным составом (замасливателем) для предотвращения слипания в процессе изготовления, хранения и для лучшего распределения по всему объему в процессе приготовления бетонной смеси.

Технические характеристики

Наименование свойства	Значение
Материал	Полипропилен (C ₃ H ₆)
Тип	мультифиламентное волокно
Длина волокна, мм	1,5; 2,2; 3; 6; 12; 18; 30; 45
Плотность, кг/м ³	910
Термостойкость, °С	160 – 170
Диаметр волокна, мкм	20 – 30
Форма сечения	круглая
Модуль упругости, МПа	3500-3900
Прочность на растяжение, МПа	170 – 400
Удлинение при разрыве, %	150 – 250
Абсорбция за 24 часа, %	0,01 – 0,03
Количество волокон в 1 кг, шт.	350 – 500 млн.
Тип замасливателя	4С (водосовместимый силан)
Массовая доля замасливателя, %	не менее 0,3

Полипропиленовое мультифиламентное волокно выпускается в соответствии с ТУ У 24.7 – 32781078 – 001:2006, ТУ 2272 – 006 – 13429727 – 2007, ТУ 5458 – 001 – 82255741 – 2008 и ТУ 2272 – 001 – 90345062 – 2012.

Нормы расхода и область применения

Область применения	расход, кг/м ³
Пенобетон, полистиролбетон, ячеистые бетоны Стяжки цементно-песчаные, тротуары, отмостки	0,6 ÷ 0,9
Мосты, аэродромные и дорожные конструкции	1,8 ÷ 2,7
Автостоянки, наружные площадки, автодороги	1,0 ÷ 1,5
Промышленные и бытовые полы под шлифовку	1,0 ÷ 2,7
Средненагруженные промышленные конструкции	1,0 ÷ 1,3
Гидротехнические сооружения	2,0 ÷ 2,3
Декоративные печатные и отливаемые изделия	0,4 ÷ 0,8
Фибробетоны для сейсмических районов	2,0 ÷ 2,6
Строительные растворы, сухие смеси и штукатурка	0,6 ÷ 0,9

ПОЛИПРОПИЛЕНОВАЯ ФИБРА (II)

Фибриллированная полипропиленовая фибра представляет собой моноволокно с профилированной поверхностью (отдельные жесткие волокна синусоидальной и волнистой формы) и изготавливается из ориентированного первичного полипропилена.

Технические характеристики

Наименование свойства	Значение
Материал	Полипропилен (C ₃ H ₆)
Тип	фибриллированное волокно
Длина волокна, мм	18; 20; 40; 50
Плотность, кг/м ³	910
Термостойкость, °С	170 – 175
Диаметр волокна, мкм	30 – 780
Форма сечения	круглая
Высота рифления / шаг рифления, мм	1,5 / 7,0
Модуль упругости, МПа	3500 – 4000
Прочность на растяжение, МПа	350 – 770
Удлинение при разрыве, %	10 – 12
Абсорбция за 24 часа, %	0,01 – 0,03
Количество волокон в 1 кг, шт.	52000

Нормы расхода и область применения

Область применения	расход, кг/м ³
Конструкции жилых и промышленных зданий	2,9 ÷ 5,8
Промышленные полы и стяжки	2,7 ÷ 4,7
Дорожные конструкции, мосты, тоннели	5,8 ÷ 11,6
Гидротехнические сооружения	11,6 ÷ 14,0
Сборные конструкции	3,0 ÷ 7,0

Полипропиленовое фибриллированное волокно выпускается в соответствии с ТУ У 25.2-32781078-004:2009.

Исходный материал волокон – полипропилен – чувствителен к действию УФ – лучей, но имеет высокую химическую стойкость к кислотам и щелочам. Сильными окислителями полипропилена являются хлорсульфоновая $\text{SO}_2\text{Cl}(\text{OH})$, серная $\text{H}_2\text{SO}_{4(\text{к})}$ и соляная $\text{HCl}_{(\text{к})}$ кислоты, а также некоторые галогены.

СТЕКЛЯННАЯ ФИБРА

Стекловолокно производится путем продавливания расплава стекла специального химического состава через прядильные фильеры и получается в виде бесконечных элементарных волокон, которые формируются в дальнейшем в комплексные нити или ровинг. Исходный стеклянный ровинг может быть переработан путем резки, рубки или разрывного штапельирования в дискретные волокна с длиной от 0,1 до 50 см и диаметром 0,1 – 25 мкм.

Состав и свойства стекловолокна определяется характеристиками исходного стекла. Наиболее распространенными являются следующие марки стекол: S (strength) – высокой прочности; C (chemical) – высокой химической стойкости; A (alkali) – с высоким содержанием щелочных металлов; E (electrical) – низкой электрической проводимости, К - кварцевое.

Технические характеристики

Наименование свойства	Марка исходного стекла				
	А	С	Е	S	К
Тип стекла	известково-натриевое	натрийборосиликатное	алюмоборосиликатное	магнезиальноалюмосиликатное	кварцевое
Длина волокна, мм	1; 2; 4; 6; 8; 12; 25,4; 50				
Содержание SiO_2 , %	70,5	64,0	53,0	64,2	99,95
Плотность, кг/м^3	2500	2490	2540	2480	2210
Термостойкость, °С	730	750	840	1056	1670
Диаметр волокна, мкм	9 – 11	12 – 14	9 – 10	10 – 13	0,7–2,1
Форма сечения	различная				
Прочность на растяжение, МПа	3000 – 3500	3100	3600 – 3700	4600	3400
Модуль упругости, МПа	7400	6900	7200	8600	7500
Абсорбция, %	0,1 – 0,3				
Удлинение при разрыве, %	2,0 – 4,3	4,2 – 5,4	3,3 – 4,8	4,5 – 4,9	5
Тип замасливателя	пассивные и активные (гидрофобно-адгезионные): крахмал, силаны, ПЭ, 4”Э”, 4”П”, 76 и А-4I				
Массовая доля замасливателя, %	устанавливается по ТУ и ГОСТ Р 53237-2008				

Нормы расхода и область применения

Все виды стеклянной фибры имеют низкую щелочестойкость, поэтому область ее применения и расход определяются целесообразностью и технико-экономическими обоснованиями.

Кварцевое волокно марки ТКВ выпускается в соответствии с ТУ 6-48-5786902-78-91 и применяется для атомного, военного и космического строительства.

БАЗАЛЬТОВАЯ ФИБРА (I)

Базальтовую фибру получают из расплавов базальтовых горных пород. Производство непрерывного базальтового волокна, также как и стеклянного, основано на вытягивании расплавленного базальта через фильеры плавильного оборудования с последующей переработкой в ровинг. Производятся различные виды базальтовых волокон: непрерывные штапельные – микроволокно <0,5мкм, ультратонкое 0,5–1 мкм, супертонкое 1–3 мкм, тонкое 3–11 мкм, утолщенное 11–20 мкм, грубое > 20 мкм.

Основная масса исходного материала сложена микролитами плагиоклазов, клинопироксена, магнетита или титаномагнетита, а также вулканическим стеклом. Вкрапления обычно представлены оливином, клинопироксеном, плагиоклазом, редко ортопироксеном или роговой обманкой. Наиболее распространенным аксессуарным минералом является апатит.

Содержание кремнезёма (SiO_2) колеблется от 45 до 52-53 %, суммы щелочей Na_2+K_2 до 5 %, в щелочных базальтах до 7 %. Прочие оксиды могут распределяться так: $\text{TiO}_2=1,8-2,3$ %; $\text{Al}_2\text{O}_3=14,5-17,9$ %; $\text{Fe}_2\text{O}_3=2,8-5,1$ %; $\text{FeO}=7,3-8,1$ %; $\text{MnO}=0,1-0,2$ %; $\text{MgO}=7,1-9,3$ %; $\text{CaO}=9,1-10,1$ %; $\text{P}_2\text{O}_5=0,2-0,5$ %.

Технические характеристики

Наименование свойства	Значение
Материал	Базальт
Тип	монофиламентное волокно
Длина волокна, мм	3; 6; 12; 15; 18; 25; 27; 50
Плотность, кг/м ³	2600 – 2800
Термостойкость, °С	700
Диаметр волокна, мкм	9; 13; 17; 20; 150; 200; 400
Форма сечения	круглая
Модуль упругости, МПа	7100 – 11000
Прочность на растяжение, МПа	1600 – 3600
Удлинение при разрыве, %	1,4 – 3,6
Абсорбция за 24 часа, %	до 0,02
Количество волокон в 1 кг, шт.	70 – 100 млн.
Тип замасливателя	4С (водосовместимый силан), парафиновая эмульсия, прямые и неорганич. замасливатели
Массовая доля замасливателя, %	0,3 – 1

Нормы расхода и область применения

Область применения	расход, кг/м ³
Пенобетон, полистиролбетон, ячеистые бетоны	0,6 ÷ 1,0
Мосты, аэродромные и дорожные конструкции	1,5 ÷ 2,7
Автостоянки, наружные площадки, автодороги	1,5 ÷ 2,0
Промышленные и бытовые полы под шлифовку	1,0 ÷ 1,5
Средненагруженные промышленные конструкции	0,6 ÷ 1,5
Гидротехнические сооружения	2,0 ÷ 2,7
Декоративные печатные и отливаемые изделия	0,6 ÷ 1,2
Фибробетоны для сейсмических районов	0,9 ÷ 2,0
Строительные растворы, сухие смеси и штукатурка	0,6 ÷ 0,9

Базальтовое волокно выпускается в соответствии с ТУ 5769-004-80104765-2008 и ТУ 5952-002-91341008-2012.

БАЗАЛЬТОВАЯ ФИБРА (II)

Микрофибра базальтовая модифицированная (МБМ) получается путём пропитки измельченной минеральной ваты, производимой из расплава базальтовых пород. Доля основного компонента – базальтовой ваты с органической пропиткой составляет 99,3 – 99,6 %. В качестве модификатора используют углеродный наномодификатор фуллероидного типа (астрален) в количестве 0,0001–0,01 % по ТУ 2166-001-13800624-2003, смесь едкого натрия (0,05–0,1 %) и воды (0,3–0,5 %).

Технические характеристики

Наименование свойства	Значение
Материал	Базальт
Тип	порошковое микроволокно
Длина волокна, мм	0,1 – 0,5
Плотность насыпная, кг/м ³	800
Термостойкость, °С	750
Диаметр волокна, мкм	8; 10
Форма сечения	круглая
Модуль упругости, МПа	7100 – 11000
Абсорбция за 24 часа, %	до 0,02
Содержание органических веществ, %	2

Нормы расхода и область применения

Область применения	расход, кг/м ³
Пенобетон, полистиролбетон, ячеистые бетоны	0,3 ÷ 0,9
Мосты, аэродромные и дорожные конструкции	5,0 ÷ 25,0
Автостоянки, наружные площадки, автодороги	2,0 ÷ 12,0
Промышленные и бытовые полы под шлифовку	1,0 ÷ 4,5
Стяжки цементно-песчаные, тротуары, отмостки	0,5 ÷ 10,0
Гидротехнические сооружения	1,8 ÷ 2,4

Декоративные печатные и отливаемые изделия	0,9 ÷ 3,0
Фибробетоны для сейсмических районов	5,0 ÷ 20,0
Строительные растворы, сухие смеси и штукатурка	1,5 ÷ 4,5

Модифицированная базальтовая фибра (МБМ) выпускается в соответствии с ТУ 5761-014-13800624-2004; успешно применяется для армирования асфальтобетонов, пластмасс и минеральных смесей с целью улучшения эксплуатационных свойств.

ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛЬНАЯ ФИБРА

Полиакрилонитрильные (нитроновые) волокна - это синтетические волокна, получаемые из полимера акрилонитрила. Формуют волокна из прядильного раствора по сухому и мокрому способу. Волокна ПАН вырабатывают в резаном виде или в форме жгута.

Углеродное волокно (карбонизированный ПАН) производится из полиакрилонитрилового волокна путем окислительного пиролиза и стабилизации в инертном газе.

Технические характеристики

Наименование свойства	Значение	
Материал	Акрилонитрил $[\text{CH}_2\text{CH}(\text{CN})]_n$	
Тип	мультифиламентное волокно	
Длина волокна, мм	35 – 150	6; 12; 18
Плотность, кг/м ³	1140 – 1170	1750 – 1950
Термостойкость, °С	180	300 – 400
Диаметр волокна, мкм	20	5 – 15
Форма сечения	дугобразная, округлая с выступами	
Модуль упругости, МПа	1500 – 15000	20000 – 70000
Прочность на растяжение, МПа	460 – 600	2900 – 4000
Удлинение при разрыве, %	2 – 50	0,45 – 2,5
Абсорбция за 24 часа, %	3,5 – 5	1 – 1,5
Количество волокон в 1 кг, шт.	600 млн.	
Тип замасливателя	полиэтиленгликолевые эфиры и оксиэтилированные спирты, композиция на основе минерального масла, алкилфосфатов и неионогенного эмульгатора	
Массовая доля замасливателя, %	устанавливается по ТУ	

Нормы расхода и область применения

Полиакрилонитрильные и углеродные волокна имеют высокую стоимость, поэтому область их применения и расход определяются целесообразностью и технико - экономическими обоснованиями. Рекомендуемый расход ровинга от 0,5 до 4 кг/м³.

Тканевые материалы из углеволокна (по ТУ 1916 – 001 – 9637987 – 2009) применяются для усиления конструкций и в авиационной и атомной промышленности.

ЦЕЛЛЮЛОЗНО - ПОЛИМЕРНАЯ ФИБРА

Целлюлоза – это органический полимер с высокой молекулярной массой, получаемый из древесины. Химическое полимерное покрытие поверхности волокон обеспечивает дополнительную защиту от щелочной и агрессивной среды.

Технические характеристики

Наименование свойства	Значение
Материал	Целлюлоза / полимер
Тип	порошковое микроволокно
Длина волокна, мм	0,02 - 2,5
Плотность, кг/м ³	1100 - 1300
Термостойкость, °С	200
Диаметр волокна, мкм	18; 25
Форма сечения	круглая
Модуль упругости, МПа	8500
Прочность на растяжение, МПа	750
Абсорбция за 24 часа, %	до 85
Количество волокон в 1 кг, шт.	до 1200 млн.
Площадь поверхности, м ² /г	2,5
Содержание целлюлозы, %	56 – 99,5
Влажность, %	4 - 8

Нормы расхода и область применения

Область применения волокон		расход, кг/м ³
Затирки для швов	TECHNOCEL 165 / 150 -1	0,3 ÷ 1,0
Строительные растворы	TECHNOCEL 1004-7 N	0,2 ÷ 0,5
	TECHNOCEL 1004-3 Z	0,1 ÷ 0,4
Мелкозернистый бетон (сухая смесь)	TECHNOCEL 165 / 500-1	0,4 ÷ 0,6
	TECHNOCEL 1004	0,2 ÷ 0,5
Штукатурные растворы (до 20 мм)	TECHNOCEL 500-1	0,5 ÷ 1,0
	TECHNOCEL 1004-3 Z	0,3 ÷ 0,6
Стяжки	TECHNOCEL 500-1 /1004-7 N	0,2 ÷ 0,5
Изолирующая штукатурка	TECHNOCEL 500-1	0,3 ÷ 0,5
	TECHNOCEL 1004-7 N	0,3 ÷ 0,5
Ячейстые бетоны	TECHNOCEL 1004 / 1004-1 N	3,0 ÷ 5,0
Тонкие стены	UltraFiber® 500	0,68 ÷ 1,8

МИНИМАЛЬНЫЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ ДЛЯ ДОРОЖНЫХ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

Вид изделия и конструкции		Класс по прочности		Морозостойкость	Водопоглощение	Водонепроницаемость
		при сжатии	на растяжение при изгибе	в хлористых солях		
Бортовой камень Плита тротуарная	ГОСТ 6665-91 ГОСТ 17608-91	B22,5 (M-300)	B _{тб} 3,2	F200	до 6 %	-
Лотки дорожные водоотводные	ГОСТ 32956-2014	B30 (M-400)	-	F300	до 6,5 %	W6
Элементы колодцев	ГОСТ 8020-80	B15 (M-200)	-	F100	-	W4
Напорные трубы	ГОСТ 26819-86	B30 (M-400)	B _{тб} 2,4	-	до 9 %	-
Выравнивающие слои	СП 31.13330 СП 32.13330 СП 34.13330 СП 121.13330	B25 (M-350)	B _{тб} 1,2	F200	-	W8
Покрытия дорог и аэродромов		B30 (M-400)	B _{тб} 4,0	F300	-	W8
Переходные плиты			B _{тб} 3,6	F300	-	W6
Деформационные швы	СП 46.13330	B40 (M-550)	-	F300	-	W12
Подферменные площадки		B30 (M-400)	-	F300	-	W8
Инъекционный раствор		B22,5 (M-300)	-	по требованиям к конструкции	-	по требованиям к конструкции
Обделки и конструкции тоннелей	СП 122.13330	B25 (M-350)	-	F100	-	W6

ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ:

Номер	Наименование
ГОСТ 30515-97	Цементы. Общие технические условия
ГОСТ 31108-2003	Цементы общестроительные. Технические условия
ГОСТ 22266-94	Цементы сульфатостойкие. Технические условия
ГОСТ 310.4-81*	Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии
ГОСТ 30744-2001	Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка
ГОСТ 310.3-76*	Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема
ГОСТ 5382 – 91	Цементы и материалы цементного производства. Методы химического анализа
ГОСТ 24640-91	Добавки для цементов. Классификация
ГОСТ 6139-2003	Песок для испытаний цемента. Технические условия
ГОСТ 8736-93*	Песок для строительных работ. Технические условия
ГОСТ 8735-88*	Песок для строительных работ. Методы испытаний
ГОСТ 23732-2011	Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия
ГОСТ 24211-91	Добавки для бетонов. Общие технические требования
ГОСТ 30459-2008	Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности
СНиП 82-02-95	Федеральные (типовые) элементные нормы расхода цемента при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций
ГОСТ 10181-2000	Смеси бетонные. Методы испытаний
ГОСТ 7473-2010	Смеси бетонные. Технические условия
ГОСТ 12730.3.-78	Бетоны. Методы определения водопоглощения
ГОСТ 18105-2010	Бетоны. Правила контроля и оценки прочности
ГОСТ 10180-2012	Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам
ГОСТ 31914-2012	Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества
ГОСТ 26633 – 2012	Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия
ГОСТ 25192 – 2011	Бетоны. Классификация и общие технические требования
ГОСТ 13015-2012	Изделия железобетонные и бетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения

ГОСТ 8829-94	Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости
СП 46.13330.2012	Мосты и трубы. Актуализированная редакция СНиП 3.06.04-91
СП 63.13330.2012	Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003
СП 130.13330.2012	Производство сборных железобетонных конструкций и изделий. Актуализированная редакция СНиП 3.09.01-85
ТУ 5743-048-02495332-96	Микрокремнезем конденсированный
ГОСТ 6665-91	Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия
ГОСТ 17608-91	Плиты бетонные тротуарные. Технические условия
ВСН 56-97	Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций
СП 52-104-2006	Сталефибробетонные конструкции
ОДМ 218.2.014-2011	Методические рекомендации по применению сталефибробетона при ремонте мостовых сооружений
РТМ-17-03-2005	Руководящие технические материалы по проектированию, изготовлению и применению сталефибробетонных конструкций на фибре из стальной проволоки
СНиП 2.03.03-85	Армоцементные конструкции
ГОСТ 27006-86	Бетоны. Правила подбора состава
ГОСТ 29332-2006	Волокна химические. Методы определения массовой доли замасливателя
ГОСТ Р 52581-2006	Ровинг из стеклянных нитей. Технические условия
ГОСТ 17139-2000	Стекловолокно. Ровинги. Технические условия
ГОСТ Р 51626-2000	Волокна химические (синтетические). Требования безопасности
ГОСТ 12730.3 – 78	Бетоны. Метод определения водопоглощения
ГОСТ 12730.5 – 84	Бетоны. Методы определения водонепроницаемости
ГОСТ 10060 – 2012	Бетоны. Методы определения морозостойкости

СОДЕРЖАНИЕ:

1. Общие положения.....	2
2. Область применения.....	4
3. Технические требования к материалам.....	4
4. Общие требования для определения состава мелкозернистого фибробетона.....	8
5. Определение состава модифицированного мелкозернистого фибробетона.....	10
6. Приготовление модифицированной фибробетонной смеси.....	14
7. Формование изделий.....	17
8. Твердение образцов и изделий.....	18
9. Контроль качества и технологии производства бетонов и фибробетонов.....	19
10. Пример расчета состава мелкозернистого фибробетона.....	19
ПРИЛОЖЕНИЯ:	
1. Определение водопотребности мелкого заполнителя и микрозаполнителя в бетоне.....	23
2. Исследование свойств микрокремнезема.....	24
3. Определение оптимального количества активной минеральной добавки.....	25
4. Исследование технологических свойств бетонных и фибробетонных смесей.....	27
5. Определение водопоглощения бетонов и фибробетонов.....	30
6. Определение водонепроницаемости бетонов и фибробетонов...	31
7. Определение морозостойкости бетонов и фибробетонов.....	33
8. Рекомендуемая удобоукладываемость смеси.....	35
9. Требования к минимальному расходу цемента.....	36
10. Рациональные марки цементов для бетона различных классов.	37
11. Соотношение между классами бетона по прочности на сжатие и растяжение и марками.....	37
12. Гиперпластификаторы и особенности их применения.....	39
13. Основные виды волокон для дисперсного армирования и их свойства.....	45
14. Минимальные эксплуатационные требования для дорожных изделий и конструкций.....	53
ПЕРЕЧЕНЬ НОРМАТИВНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	54

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
Костромская Государственная Сельскохозяйственная Академия
ОАО «КОСТРОМСКОЙ СИЛИКАТНЫЙ ЗАВОД»

Согласовано
Проректор по НИР
ФГБОУ ВО КГСХА

(Демьянова – Рой Г.Б.)
«20» ноября 2015 г.

Утверждаю
Управляющий предприятием
ОАО «Костромской силикатный завод»

(Смирнов М.А.)
«20» ноября 2015 г.

Технологический регламент

на производство модифицированных мелкозернистых
фибробетонных смесей для дорожных изделий

СОДЕРЖАНИЕ:

1. Общие данные.....	2
2. Требования к материалам.....	2
3. Проектирование и подбор состава бетона.....	3
4. Приготовление бетонных и фибробетонных смесей.....	5
5. Приготовление и применение водных растворов добавок.....	6
6. Производственный контроль приготовления бетонных и фибробетонных смесей.....	7
7. Технические требования к бортовому камню.....	8
8. Технические требования к тротуарной плитке.....	9
9. Формование изделий.....	10
10. Описание технологической последовательности производства смесей и формовки изделий.....	11
11. Охрана труда и техника безопасности.....	13
12.Список используемой литературы.....	14
13. Приложения.....	16

Технологический регламент на производство модифицированных мелкозернистых фибробетонных смесей для дорожных изделий и конструкций

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. «Технологический регламент» содержит основные требования к исходным материалам и технологическому процессу, а также описывает виды и способы контроля при производстве дорожных изделий (тротуарной плитки, бортового камня и т.д.) из модифицированного мелкозернистого фибробетона.

1.2. Настоящий технологический регламент распространяется на модифицированные мелкозернистые фибробетонные смеси для виброштампованных дорожных изделий, приготовленных на цементных вяжущих, плотных мелких заполнителях, с полифункциональными химическими добавками и дисперсным армированием. Фибробетонные смеси производятся непосредственно на предприятии и после проверки соответствия технологических свойств используются для изготовления дорожных изделий и конструкций.

1.3. Технологический регламент предусматривает производство мелкозернистых бетонов и фибробетонов классов по прочности при сжатии до В30 (М 400), марок по морозостойкости от F 300 (1) для обычного бетона до F300 (II) для дорожного бетона, по водонепроницаемости – до W 14.

1.4. Основной целью выполнения положений «Технологического регламента» является производство модифицированных бетонных и фибробетонных смесей для дорожных изделий и конструкций, удовлетворяющих требованиям ГОСТ и нормативных документов к бетону по прочности, надежности и долговечности.

1.5. В «Технологическом регламенте» предусмотрены поставки составляющих (главным образом инертных) от постоянных поставщиков.

1.6. Составы бетонных и фибробетонных смесей с полифункциональными химическими добавками подбираются с учетом технологических (подвижность, сохраняемость, воздухосодержание, расслаиваемость), прочностных (прочность при сжатии, на растяжение при изгибе) и эксплуатационных (морозостойкость, водонепроницаемость, водопоглощение) свойств.

1.7. При изменении действующих нормативных документов в «Технологический регламент» будут внесены соответствующие изменения.

2. ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ

2.1. В качестве вяжущего для приготовления мелкозернистого бетона и фибробетона следует использовать портландцемент, шлакопортландцемент и сульфатостойкий цемент, соответствующие требованиям ГОСТ 30515-97, ГОСТ 31108-2003 и ГОСТ 22266-94 с содержанием трехкальциевого алюмината (C_3A) не более 8 %. Количество щелочных оксидов в пересчете на Na_2O не должно превышать 0,8 % массы цемента. Марка цемента принимается не менее 500 кгс/см². Минимальная прочность (активность) цемента должна быть не менее 42,5 МПа и нормальная густота цементного теста не более 27 %.

2.2. В качестве мелкого заполнителя для бетонов и фибробетонов дорожных конструкций рекомендуется применять природные кварцевые или кварцево-полевошпатовые пески с модулем крупности не менее 2,0 и полным остатком на сите 0,63 мм не менее 30 %. Мелкие пески с модулем крупности менее 2,0 должны использоваться при обязательном применении поверхностно – активных добавок.

2.3. Для бетона дорожных конструкций содержание в песке пылевидных и глинистых частиц в сумме не должно превышать 2,0 % по массе. Применение мелкого заполнителя с содержанием глины в виде отдельных комков не допускается.

2.4. Для обеспечения требований по морозостойкости и водонепроницаемости в бетонную смесь необходимо вводить комплексные и полифункциональные химические добавки, включающие одновременно добавки пластифицирующего и воздухововлекающего действия согласно ГОСТ 24211-2008. В качестве полифункциональных добавок, улучшающих технологические свойства бетонной смеси и качество бетона, следует применять супер- и гиперпластификаторы на основе продуктов конденсации нафталинсульфокислоты и формальдегида и поликарбоксилатов.

Общее количество химических добавок не должно превышать максимальных дозировок, указанных производителем, и быть не более 5% массы цемента.

2.5. При изготовлении фибробетонных изделий и конструкций рекомендуется применять мультифиламентные, фибриллированные и порошковые волокна из полипропилена, полиэтилена, стекла, базальта, нейлона, углерода, арамида или карбона согласно ГОСТ 29332-2006, ГОСТ Р 52581-2006, ГОСТ 17139-2000 и ГОСТ Р 51626-2000 при соответствующих предварительных испытаниях и технико – экономическом обосновании.

2.6. Сырьевые материалы, применяемые для приготовления бетонных смесей, должны соответствовать ГОСТ 30108-94 по удельной эффективной активности естественных радионуклидов.

2.7. Вода для затворения бетонных и фибробетонных смесей должна удовлетворять требованиям ГОСТ 23732-2011.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПОДБОР СОСТАВА БЕТОНА

3.1. Состав бетонной смеси подбирают в соответствии с ГОСТ 27006- 86, ВСН 150-93, “Рекомендациями по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006-86)” (М., ЦИТП, 1990) и “Рекомендациями по технологии изготовления изделий и конструкций из высокопрочных бетонов” (НИИЖБ, 1987), “Пособием по технологии формирования железобетонных изделий (к СНиП 3.09.01-85)” (НИИЖБ, 1988), “Рекомендациями по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных конструкций” (КГСХА, 2015).

3.2. Процедура подбора состава бетона должна включать оценку качества исходных материалов, назначение среднего уровня прочности, расчет состава бетонов для опытных замесов (в лабораторных смесителях), приготовление и испытание контрольных образцов, корректировку состава бетонов, проверку

рабочего состава в производственных условиях (в промышленном бетоносмесителе) и проверку составов на соответствие показателям по морозостойкости и водонепроницаемости.

3.3. Состав бетона и фибробетона подбирают исходя из условия обеспечения среднего уровня прочности, значение которого следует определять по ГОСТ 18105-2010 исходя из коэффициента вариации прочности 13,5 %.

3.4. Максимальное водоцементное отношение для требуемых марок по морозостойкости и водонепроницаемости следует назначать:

- 0,47 – для бетонов, твердеющих в естественных условиях и оттаивающих в слабоминерализованной воде при общем содержании солей не более 5 г/л, а также для бетонных массивных конструкций и блоков облицовки.

- 0,43 – для бетонов, твердеющих в естественных условиях и оттаивающих в минерализованной воде при общем содержании солей более 5 г/л;

- 0,45 – для бетонов, подвергшихся тепловой обработке, и оттаивающих в слабоминерализованной воде при общем содержании солей не более 5 г/л, а также в железобетонных и тонкостенных бетонных конструкциях толщиной менее 0,5 м; для бетона покрытия дорог и аэродромов.

3.5. Объем вовлеченного воздуха в готовых смесях для бетонов с нормированной морозостойкостью на месте укладки должен быть в пределах:

- 2 - 4 % - для бетона мостовых конструкций (проектируемая морозостойкость в пределах от F300 (I) до F500 (I));

- 5 - 7 % - для полотен и покрытий проезжей части мостов, для бетона конструктивных слоев дорог и аэродромов (проектируемая морозостойкость свыше F500 (I) до F 300 (11)).

Основные факторы, влияющие на воздухосодержание бетонной смеси:

- воздухосодержание увеличивается с повышением дозировки воздухововлекающей добавки, ростом подвижности бетонной смеси, увеличением доли песка, повышением интенсивности перемешивания бетонной смеси;

- воздухосодержание уменьшается с увеличением расхода цемента и повышением температуры бетонной смеси.

3.5. Максимальный расход цемента для класса бетона в соответствии с СП 46.13330.2012 составляет:

- до В35 включительно – 450 кг/м³;

- В40 включительно – 500 кг/м³;

- В45 и выше – 550 кг/м³.

3.6. Оптимальные дозировки цементов и процент замещения их активными минеральными добавками необходимо принимать согласно СНиП 82-02-95.

3.7. Подбор составов бетона производится по методу абсолютных объемов (сумма абсолютных объемов материалов составляет 1 м³ плотно упакованной бетонной смеси).

3.8. Погрешность дозирования исходных материалов весовыми дозаторами не должна превышать $\pm 1\%$ для цемента, воды, химических и минеральных добавок, $\pm 2\%$ – для наполнителей.

4. ПРИГОТОВЛЕНИЕ БЕТОННЫХ И ФИБРОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

4.1. Жесткие и малоподвижные смеси с осадкой конуса 2 см и менее следует приготавливать в бетоносмесителях принудительного действия.

4.2. Приготовление лабораторных составов бетонных смесей производят на сухих наполнителях и заполнителях. Без предварительной сушки необходимо произвести корректировку воды затворения смеси с учетом фактической влажности компонентов.

4.3. Компоненты смеси при зимнем бетонировании должны удовлетворять всем требованиям, которые предъявляются для бетонов, укладываемых в летних условиях. Перед загрузкой в смеситель заполнители не должны содержать смерзшихся комьев, кусков льда, наледи на зернах и снега.

4.4. Технологическим регламентом предусмотрено приготовление бетонных и фибробетонных смесей на стационарном бетоносмесительном заводе, относящихся по степени готовности согласно ГОСТ 7473 – 2010 к готовым к употреблению (БСМ) смесям.

4.5. Оттаивание и подогрев заполнителей может производиться (с помощью дымовых газов и горячего воздуха) в открытых штабелях, закрытых бункерах, сушильных барабанах и других устройствах. Подогрев воды для бетонной смеси наиболее просто и эффективно осуществлять посредством пуска в нее пара.

4.6. Все виды микроволокон в смеси можно перемешивать в любом типе смесителей (принудительного или гравитационного типа), в том числе в автобетоносмесителях следующими способами:

1) Перемешивание фибры с сухими компонентами смеси (щебень, песок, цемент, микронаполнитель), затем введение воды затворения, водных растворов химических добавок (при расходах более 0,25 % от массы вяжущего) и окончательное смешивание до готовности. Время перемешивания фибробетонной смеси увеличивается на 15%.

2) Введение волокон осуществляется после перемешивания сухих компонентов смеси, затворения их водой и водными растворами химических добавок. После тщательного перемешивания производится введение волокна в работающий смеситель. Время смешивания также увеличивается на 15 – 20 %.

3) Загрузка полипропиленовой фибры в автобетоносмеситель на заводе осуществляется после перемешивания бетонной смеси в «миксере». Времени доставки до места приемки и укладки фибробетонной смеси достаточно для полного диспергирования волокон.

4) В условиях строительной площадки в готовую бетонную смесь, доставленную автобетоносмесителем, волокна засыпают вручную по частям или дозировано в бумажных мешках порциями не более 1 кг. При этом время перемешивания фибробетонной смеси составляет 5-10 минут в зависимости от подвижности.

4.7. Продолжительность перемешивания фибробетонных смесей должна составлять не менее 3 мин и уточняться экспериментально с учетом технологических требований.

При приготовлении жестких смесей (П1 – Ж5) для вибропрессованных изделий полипропиленовая фибра вводится в начале перемешивания сухих или

влажных компонентов смеси, через 1,5-2 минуты добавляется вода и смесь перемешивается еще 1,5-3 минуты.

4.8. Для уменьшения расхода цемента, снижения вязкости фибробетонной смеси и энергоемкости ее приготовления, а также для замедления потери ее подвижности рекомендуется ограничивать температуру смеси 30 °С.

4.9. Требуемые технологические показатели качества фибробетонной смеси (влажность, однородность и т.д.) проверяются на месте укладки и формовки.

4.10. Отклонение фактического времени укладки и вибрационного уплотнения бетонной смеси от момента затворения не должно отличаться от расчетного и составляет ± 5 минут.

4.11. При укладке и уплотнении бетонной смеси необходимо следить, чтобы в смесь не попадала дополнительная вода и не происходило налипание смеси к рабочему оборудованию.

4.12. В летнее, сухое и жаркое время следует предохранять свежее уложенную смесь и отформованные изделия от чрезмерного испарения влаги.

5. ПРИГОТОВЛЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ ВОДНЫХ РАСТВОРОВ ДОБАВОК

5.1. Бетоносмесительные узлы должны быть оборудованы помещениями и устройствами для хранения, приготовления и дозирования химических добавок. При использовании комплексных добавок каждый компонент, как правило, готовится и дозируется отдельно. Допускается заблаговременное приготовление комплексных добавок в одном растворе после опытной проверки их совместимости.

5.2. Для приготовления бетонных смесей применяются в основном водные растворы добавок определенной (рабочей) концентрации:

1-2 % – для воздухововлекающих;

10-20% – для пластифицирующих;

35-40 % – для супер- и гиперпластификаторов;

5.3. Перед подачей из одной ёмкости, в другую и перед применением растворы добавок необходимо тщательно перемешивать (механическими устройствами, насосами или барботажем – сжатым воздухом). При перемешивании растворов поверхностно-активных веществ необходимо учитывать возможность пенообразования. Для его уменьшения рекомендуется врезать трубопроводы подачи добавок в ёмкость в ее нижней части.

Запрещается применение раствора добавки при наличии в нём осадка.

5.4. Запасы растворов химических добавок на бетонном заводе должны обеспечивать не менее 1 смены его непрерывной работы.

5.5. При организации процессов приготовления и подачи добавок в бетонную смесь необходимо учитывать, что предпочтительным является двухстадийный процесс приготовления раствора рабочей концентрации, поэтому следует руководствоваться следующими положениями:

В первой ёмкости (первая стадия) дозу товарного продукта помещают в сетку и растворяют или разбавляют в горячей воде (до + 80°С) при интенсивном перемешивании для получения растворов первичной повышенной концентрации

(25...35%). На первой стадии происходит выпадение в осадок нерастворимых частиц и посторонних примесей.

Во второй ёмкости (вторая стадия) горячий раствор повышенной концентрации разбавляют холодной водой до получения раствора с рабочей концентрацией при температуре + 20°C.

Раствор первичной концентрации готовят в объеме 1...7 суточной потребности, рабочий раствор – не менее потребности на смену.

5.5. Необходимо предусматривать возможность компоновки технологической линии для применения двух- и трехкомпонентных добавок.

6. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ КОНТРОЛЬ ПРИГОТОВЛЕНИЯ БЕТОННЫХ И ФИБРОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

6.1. Бетонные и фибробетонные смеси должны быть приняты и испытаны техническим контролем предприятия изготовителя.

6.2. Каждая партия бетонной смеси сопровождается документом о качестве в соответствии с. к ГОСТ 7473-2010.

6.3. Приемо-сдаточные испытания бетонных смесей (бетона) производятся не реже одного раза в смену:

- удобоукладываемость (подвижность);
- температура;
- средняя плотность;
- объем вовлеченного воздуха;
- расслаиваемость: растворо- и водоотделение (при необходимости);
- сохраняемость свойств бетонной смеси во времени;
- средняя прочность в 7 и 28 суток.

6.4. Влажность смеси определяют после заполнения бункеров новыми материалами, а также при смене технологии производства, внедрении новых составов или отдельных компонентов смеси.

6.5. Периодические испытания бетона и фибробетона:

- содержание естественных радионуклидов в исходных материалах – один раз в год;

- морозостойкость – один раз в 6 месяцев;
- водонепроницаемость – один раз в 6 месяцев.

6.7. Периодические испытание изделий и конструкций следует проводить при внесении конструктивных изменений (смене составов и показателей качества бетонов, схем армирования), изменении технологии производства и в процессе серийного производства не реже одного раза в год.

7. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К БОРТОВОМУ КАМНЮ

7.1. Камни бортовые изготавливаются по ГОСТ 6665-91 из мелкозернистого бетона класса по прочности при сжатии не менее В30 (М-400) и по прочности на растяжение при изгибе не менее $R_{bt} 4,0$. Допускается применять бетоны более высоких классов по прочности при сжатии и на растяжение при изгибе.

7.2. Нормируемая отпускная прочность бетона в процентах от класса бетона по прочности на сжатие должна быть не менее 90%.

7.3. Марку по морозостойкости принимают по проектной документации конкретного объекта строительства, но не ниже F 250.

7.4. Водопоглощение бетона камней не должно превышать 6 % для камней из мелкозернистого бетона; не более 5 % - из тяжелого бетона.

7.5. Трещины на поверхности изделий не допускаются, за исключением усадочных и других поверхностных технологических трещин шириной не более 0,1 мм и длиной до 50 мм в количестве не более 5 штук на 1 м² поверхности камней.

7.6. Категория лицевой бетонной поверхности – А6, не лицевой – А7 по ГОСТ 13015-2011.

7.7. Удельная эффективность естественных радионуклидов бетона в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, должна быть не более 740 Бк/кг, а применяемых вне населенных пунктов – не более 1350 Бк/кг.

7.8. Для получения требуемого цвета рекомендуется применять пигменты по таблице 1.

Таблица 1

Цвет	Пигменты		Рекомендуемый расход пигментов, % от массы цемента
	Неорганические (минеральные)	органические	
Красный	Редоксайд по ТУ 6-10-667	-	5
	Сурик железный по ГОСТ 8135	-	8
Желтый	Охра по ТУ 301-10.019	-	5
	Пигмент желтый железистый по ГОСТ 18172	-	5
Зеленый	Окись хрома по ГОСТ 2912	-	8
Голубой	-	Фталоцианиновый по ГОСТ 6220	0,5
	Лазурь железная	-	5
Белый	Портландцемент белый по ГОСТ 965	-	-
Черный	Углерод технический (сажа) по ГОСТ 7885	-	5

7.9. Допуски и отклонения геометрических размеров бортовых камней приведены в приложении 1.

8 ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ТРОТУАРНОЙ ПЛИТКЕ

8.1. Плиты тротуарные изготавливаются из мелкозернистого бетона класса по прочности при сжатии не менее В22,5 (М-300) и по прочности на растяжение при изгибе не менее $B_{тб}$ 3,2. Допускается применять бетоны более высоких классов по прочности при сжатии и на растяжение при изгибе.

8.2. Значение нормируемой отпускной прочности мелкозернистого бетона тротуарной плитки должно составлять 90 % от класса бетона по прочности при сжатии и на растяжение при изгибе в любое время года.

8.3. Марку по морозостойкости принимают по проектной документации конкретного объекта строительства и по таблице 2 в зависимости от условий эксплуатации тротуарной плитки.

Таблица 2

Расчетная температура наружного воздуха, °С	Марка бетона по морозостойкости
ниже - 45	F300
от -15 до -45 включ.	F200
от -5 до -15 включ.	F150
от 0 до -5 включ.	F100

8.4. Водопоглощение бетона плит (тротуарной плитки, брусчатки) не должно превышать 6 % из мелкозернистого бетона, не более 5 % из тяжелого бетона.

8.5. Трещины на поверхности плит (тротуарной плитки, брусчатки) не допускаются, за исключением поверхностных и технологических шириной не более 0,1 мм и длиной до 50 мм в количестве не более 5 шт. на 1 м² поверхности армированных плит (тротуарной плитки, брусчатки) из тяжелого бетона.

8.6. Категория лицевой бетонной поверхности – А6, не лицевой – А7 по ГОСТ 13015-2011.

8.7. Удельная эффективность естественных радионуклидов бетона в пределах населенных пунктов и зон перспективной застройки, должна быть не более 740 Бк/кг, а применяемых вне населенных пунктов – не более 1350 Бк/кг.

8.8. Для изготовления цветных плит (тротуарной плитки, брусчатки) следует применять пигменты. Виды и объем (масса) пигментов, вводимых в бетонную смесь, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Цвет	Пигменты		Рекомендуемый расход пигментов, % от массы цемента
	неорганические (минеральные)	органические	
Красный	Редоксайд по ТУ 6-10-667	-	5
	Сурик железный по ГОСТ 8135	-	8
	Железоокислый по ТУ МХП 1911	-	5
Желтый	Железоокисный по ТУ МХП 1927	-	5
Зеленый	Окись хрома по ГОСТ 2912	-	8
	-	Фталоцианиновый по ГОСТ 6220	0,5
Голубой	-	Фталоцианиновый по ГОСТ 6220	0,5

Черный	Руда марганцевая при содержании окиси марганца > 90 % по СТУ 100-142	-	10
Белый	Белый цемент по ГОСТ 965	-	-

8.9. Допуски и отклонения геометрических размеров тротуарной плитки приведены в приложении 2.

9. ФОРМОВАНИЕ ИЗДЕЛИЙ

9.1. Укладка бетонных и фибробетонных смесей в форму должна осуществляться в соответствии с технологической картой на изготовление конструкции и с учетом вида и возможностей формовочных машин и механизмов.

9.2. Для получения композита слитного строения коэффициент виброуплотнения смеси должен приниматься по таблице 4.

Таблица 4

Вид смеси	Марка смеси по удобоукладываемости		
	СЖЗ-СЖ1	Ж4-Ж2	Ж1-П2
Тяжелый бетон	0,92 - 0,93	0,95 - 0,96	0,96 - 0,97
Мелкозернистый бетон	0,93 - 0,94		0,97 - 0,98

9.3. Длительность и интенсивность виброуплотнения смесей с воздухововлекающими добавками должны обеспечить сохранение в бетоне требуемого количества вовлеченного воздуха.

9.4. Рекомендуются формовать изделия и конструкции так, чтобы поверхности, подвергающиеся в условиях эксплуатации влиянию внешних воздействий, были обращены при формировании к бортовой опалубке или днищу.

9.5. Замораживание и размораживание приготовленной бетонной смеси и свежееуложенного бетона не допускается.

9.6. Для предупреждения налипания бетонной и фибробетонной смеси к формовочному оборудованию рекомендуется контролировать влажность смеси (максимальное значение $W_{CM}=8\%$).

10. ОПИСАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СМЕСЕЙ И ФОРМОВКИ ИЗДЕЛИЙ

Мелкий заполнитель поставляется железнодорожным и автомобильным транспортом и выгружается в открытые склады. Из открытых складов заполнители перегружаются в загрузочные бункеры заполнителей. Заполнители загружаются автопогрузчиком в 20-ти тонные бункера, оборудованные подогревом. Для выпуска песка установлены ленточные питатели. Дозирование компонентов производится последовательно загрузочным устройством через дозатор ДИ-5000Д с точностью +2,5%. После набора заданной дозы материал

выгружается ленточным питателем на транспортер и загружается в бетоносмеситель.

Цемент поставляется железнодорожным транспортом в хопрах, выгружается самотеком через затворы в подвал, оборудованный воздушным насосом. Подача в силосы и бункеры на бетонном заводе осуществляется воздушным насосом. Из бункеров винтовым питателем цемент подается в весовой дозатор ДЦ-500Д, точность дозирования $-2\% - +2\%$, и далее через затвор в бетоносмеситель.

Вода из скважины подается в бойлер емкостью 10 м^3 с зимним подогревом. Из бойлера насосом вода подается в емкость $1,5 \text{ м}^3$ на бетонный завод и далее в дозатор жидкости ДЖ-400Д. В зимнее время вода подогревается до 70°C , в летнее используется без подогрева.

Химические добавки поставляются в емкостях объемом 1 м^3 различной концентрации. Из емкости для хранения добавки насосом подается в помещение для добавок, где разводится до рабочей концентрации. Помещение для добавок оборудовано сжатым воздухом, водоснабжением.

Добавка смолы нейтрализованной СНВ поступает в 200 литровых бочках и хранится на складе добавок. Доведение до 1% рабочей концентрации с помощью сжатого воздуха и горячей воды производится в помещении для добавок.

Добавка ЛСТ поступает автотранспортом сухая и хранится на складе добавок. Доведение до рабочей 10% концентрации с помощью сжатого воздуха и горячей воды производится в помещении для добавок.

Допускается применение добавок другой концентрации с обязательным пересчетом фактического количества вводимых добавок лаборантом и письменным изменением дозировок непосредственно на рабочем месте оператора бетонного завода с подписью лаборанта.

Подача рабочих концентратов добавок из помещения для добавок в емкости на бетонном заводе и из емкостей в весовой дозатор производится насосом и далее в бетоносмеситель самотеком при подаче воды.

Компоненты фибробетонной смеси загружаются в бетоносмеситель в следующем порядке:

1. Заполнители.
2. Цемент
3. Фибра (микроволокна).
3. Вода, добавки.

Время перемешивания фибробетонной смеси назначается в соответствии с п.4. Пульт управления оборудован реле времени и счетчиком замесов. Бетоносмесительная установка может работать в ручном и автоматическом режиме.

Паспортная производительность – $60 \text{ м}^3/\text{час}$ при положительных температурах. Установленная мощность – 90 кВт .

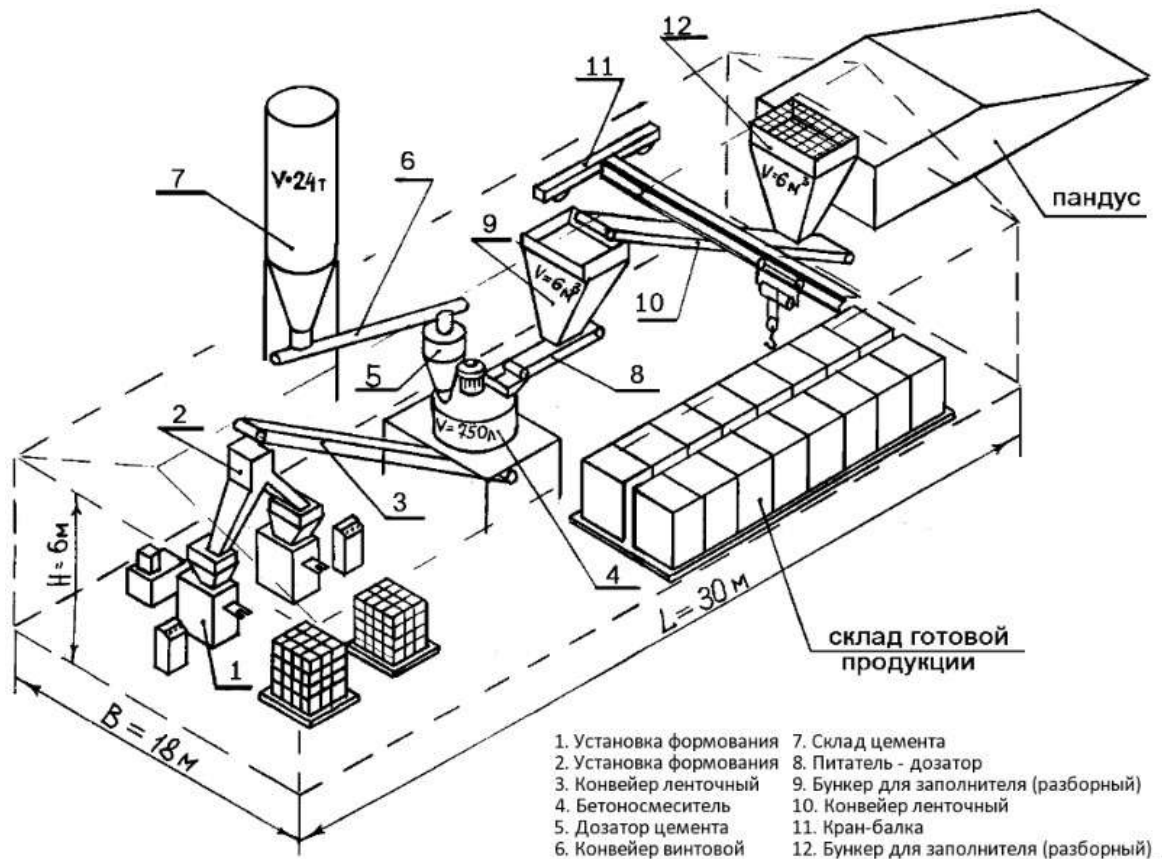
Изготовление бетонных смесей производится по дозировкам, утвержденным лабораторией с учетом влажности заполнителей. Таблица дозировок находится непосредственно на рабочем месте оператора бетонного завода.

Техническое обслуживание бетоносмесительной установки регламентируется инструкцией по эксплуатации и состоит из:

- Ежедневного технического обслуживания.
- Периодического технического обслуживания – через 260 м/ч.
- Текущий ремонт — через 2600 м/ч.
- Капитальный ремонт – через 6800 м/ч.

Объем работ определяется исходя из фактического состояния оборудования и предусматривает полную разборку, восстановление всех начальных узлов и сопряжений, замену изношенных деталей и узлов.

Технологическая схема приготовления фибробетонной смеси и производства из нее дорожных изделий



11. ОХРАНА ТРУДА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

11.1 При производстве работ должны соблюдаться требования следующих документов:

- СНиП 12-03-2001 - «Безопасность труда в строительстве» Часть 1. Общие требования.

- СНиП 12-04-2002 - «Безопасность труда в строительстве» Часть 2. Строительное производство.

11.2. К эксплуатации и обслуживанию бетоносмесительного завода допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие обучение и инструктаж и не имеющие медицинских противопоказаний.

11.3. Территория приобъектной смесительной установки должна содержаться в чистоте, не иметь рытвин и ям; проезды и проходы должны быть освещены в ночное время.

11.4. Подмости и площадки для обслуживания бетоносмесителя, расположенные выше уровня земли более чем на 1 м, а также рабочие лестницы и приямки, должны быть ограждены перилами.

11.5. Пребывание рабочих под поднятым и незакрепленным скипом, а также под работающим ленточным транспортером узла стабилизации (рассева) песка и щебня не допускается.

11.6. Очистка барабана смесителя допускается только после его остановки и отключения.

11.7. Спуск рабочих для выполнения ремонтных работ в бункера, обогреваемые с помощью пара, допускается лишь после полного их охлаждения при отсутствии в них материалов.

11.8. При работе с химическими добавками должны соблюдаться меры против ожогов, повреждения глаз и рук и отравления.

11.9. Необходимо строгое выполнение общих правил по технике безопасности и соответствующих инструкций, в частности, эксплуатации применяемых машин и агрегатов, а также электрических осветительных и отопительных приборов и оборудования.

11.10. Во время работы установки все вращающиеся и подвижные части должны быть защищены от возможности случайного попадания в них обслуживающего персонала; необходимо соблюдать осторожность при работе по очистке смесителя, шнеков, силосов. Шкаф электрооборудования, крышка пульта управления, двери пневмошкафов должны быть закрыты.

11.11. Во время работы должен вестись постоянный контроль за наличием исправного ограждения места работ (ответственный - сменный мастер).

11.12..Ознакомить /под роспись/ с данным Регламентом лиц, ответственных за безопасное производство работ кранами, крановщиков, стропальщиков, рабочих, занятых на бетонных работах (ответственный начальник участка).

Приложение 1

Допуски и отклонения геометрических размеров бортовых камней

Вид отклонения геометрического параметра	Геометрический параметр и его значение	Предельное отклонение для камней бордюров
1	2	3
Отклонение от линейного размера	Длина: Св. 400 до 1000 включительно	± 4
	Высота: Св. 200 до 250 включительно	± 4
	Ширина: По верхней кромке По основанию	± 4 ± 6
Отклонение от прямолинейности профилей лицевых поверхностей (при измерении на всей длине камня)	Длина: До 1000 включительно	6
Отклонение от перпендикулярности торцевых и смежных граней (по высоте камня)	Высота: Св. 200 до 250 включительно	2,0

Приложение 2

Допуски и отклонения геометрических размеров тротуарной плитки

Наименование отклонения геометрического параметра	Наименование геометрического параметра	Предельные отклонения для тротуарной плитки
	Длина, ширина:	
	до 250	± 4
	от 250 до 500	± 5
	» 500 » 1000	+6
	Толщина	± 5
Отклонение от прямолинейности профиля лицевой поверхности	-	5
Отклонение от плоскостности лицевой поверхности	-	5
Отклонение от перпендикулярности торцевых и смежных им граней	-	4

* Для конструктивно армированных плит (тротуарной плитки, брусчатки) отклонение от толщины защитного слоя бетона не должно превышать ± 5 мм.

СПИСОК АВТОРОВ

Декан АСФ, к.т.н.



Попов В.М.

Зам. декана по НИР



Плюснин М.Г.

Зав. кафедрой ТОиЭС, к.т.н.



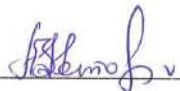
Цыбакин С.В.

Профессор кафедры ТОиЭС, к.т.н.



Соболев Г.М.

Исполнитель, инженер



Зотов А.Н.

**Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Костромская государственная сельскохозяйственная академия»**

Областная строительная лаборатория по испытанию и сертификации
строительных и дорожных материалов, изделий и конструкций

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИР
ФГБОУ ВО Костромская ГСХА



(Демьянова-Рой Г.Б.)

«20» ноября 2015 г.

ОТЧЕТ

О научно – исследовательской работе

**«Исследование свойств и испытание дорожных изделий и
конструкций из модифицированного мелкозернистого бетона с
полипропиленовой фиброй»**

РЕФЕРАТ

Отчет о НИР: 18 страниц, 5 таблиц, 4 рисунка, 1 приложение.

Объект исследования: тротуарная плитка по ГОСТ 17608-91, бортовой камень по ГОСТ 6665-91, изготовленные из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй на предприятии ОАО «Костромской силикатный завод» г. Кострома.

Цель работы: испытание дорожных изделий и конструкций (тротуарной плитки, бордюрного камня) из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй и оценка их прочностных и эксплуатационных свойств и технико – экономической эффективности.

При проведении испытаний использовались стандартные методики и оборудование. В методике проведения исследований предложены способы введения микроволокон в бетонную смесь.

В результате проведенной работы установлено, что введение модификаторов (гиперпластификатора, полипропиленовой фибры) улучшает прочностные и эксплуатационные свойства. Проведенные радиологические исследования образцов модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй подтверждают возможность его применения во всех конструкциях зданий и сооружений.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Основные буквенные обозначения.....	5
2. Общая часть.....	6
3. Методы испытаний.....	6
4. Методика проведения исследований.....	8
5. Общие выводы.....	13
6. Используемая литература.....	14
7. Приложение 1.....	15

1. ОСНОВНЫЕ БУКВЕННЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

Ц – расход цемента, кг/м^3 ;

П – расход песка, кг/м^3 ;

$\text{В}_{\text{П}}$ – водопотребность песка, %;

П/Ц – соотношение между песком и цементом;

$\text{Ф}_{\text{ПП}}$ – расход полипропиленовой фибры, кг/м^3 ;

$\text{ГП}_{\text{ж}}$ – расход гиперпластификатора (в жидком виде), л;

$\text{В}_{\text{ОБЩ}}$ – расход воды затворения, л;

В/Ц – водоцементное отношение;

$\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси, кг/м^3 ;

$\text{W}_{\text{см}}$ – влажность смеси, кг/м^3 ;

R_{max} – максимальная разрушающая нагрузка (на изделие), кг*с ;

$\text{R}_{\text{ТР}}$ – нагрузка образования трещин (на изделие), кг*с ;

$\text{R}_{\text{тб}}$ – прочность бетона на растяжение при изгибе, МПа;

$\text{В}_{\text{тб}}$ – класс бетона по прочности на растяжение при изгибе, МПа;

$\text{R}_{\text{в}}$ – прочность бетона при сжатии, МПа;

В – класс бетона по прочности при сжатии, МПа;

$\text{W}_{\text{м}}$ – водопоглощение бетона, %.

2. ОБЩАЯ ЧАСТЬ

В Областной строительной лаборатории по испытанию и сертификации строительных и дорожных материалов, изделий и конструкций на базе архитектурного факультета ФГБОУ ВПО Костромской ГСХА разработаны составы модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй с высокими прочностными и эксплуатационными свойствами.

В качестве модификаторов структуры бетона применяются:

- гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, в состав которого входят: вода – 70%, поликарбоксилатер – 18%, глюконат натриевый – 12%;
- полипропиленовая фибра длиной 18 мм, диаметром 18-20 мкм.

Необходимость испытаний произведенных бордюрных камней и тротуарной плитки обоснована внедрением состава модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй для улучшения прочностных и эксплуатационных показателей качества дорожных изделий и снижения их себестоимости за счет экономии цемента и энергозатрат при производстве.

Срок выполнения работы: сентябрь – декабрь 2015 г.

Испытания готовых изделий проводились в строительной лаборатории ФГБОУ ВПО КГСХА; контроль смесей для изготовления опытных партий изделий из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй производился строительной лабораторией ОАО «Костромской силикатный завод».

Все испытательное оборудование и средства измерительной техники поверены службами научно – технических центров стандартизации, метрологии и сертификации г. Костромы.

3. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ

2.1. Испытание портландцемента

Испытание портландцемента проводилось в соответствии с ГОСТ 30515 – 97 «Цементы. Общие технические условия», ГОСТ 31108 – 2003 «Цементы общестроительные. Технические условия», ГОСТ 310.3 – 76* «Цементы. Методы определения нормальной плотности, сроков схватывания и равномерности изменения объема», ГОСТ 30744 – 2001 «Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка», ГОСТ 6139 – 2003 «Песок для испытаний цемента», ГОСТ 23732 – 2011 «Вода для бетонов и строительных растворов».

2.2. Испытание песка

Испытание песка проводилось в соответствии с ГОСТ 8735-88* «Песок для строительных работ. Методы испытаний».

Определение водопотребности песка производилось по способу, предложенному Ю.М. Баженовым и Б.Г. Скрамтаевым. Для этого предварительно устанавливают водоцементное отношение цементного теста $(В/Ц)_{ц}$, соответствующее его нормальной густоте. Для этого 900 граммов цемента смешивают с таким количеством воды, которое обеспечит на встряхивающем столике расплыв конуса 170 мм. Затем приготавливают раствор состава Ц:П = 1:2

на исследуемом песке и подбирают $(B/C)_p$, при котором раствор имеет такой же расплыв конуса. Для раствора дозируют 300 граммов цемента и 600 граммов песка, материалы в сухом виде предварительно смешивают, заливают требуемое количество воды затворения и перемешивают в течение 5 минут. Водопотребность песка V_{II} (%) будет определяться по формуле 1:

$$V_{II} = \frac{(B/C)_p - (B/C)_ц}{2} \cdot 100 \quad (1)$$

2.3. Испытание добавки

Испытание добавки проводилось согласно ГОСТ 24211 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические требования» и ГОСТ 30459 – 2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

2.4. Испытание бетонной и фибробетонной смеси

Исследование технологических свойств бетонных и фибробетонных смесей проводилось в соответствии с ГОСТ 10181 – 2000 «Смеси бетонные. Методы испытаний»; ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия», ГОСТ 12730.2-78 «Бетоны. Метод определения влажности».

2.5. Испытание бетонов и фибробетонов

Испытание бетонов и фибробетонов проводилось в соответствии с ГОСТ 12730.1 – 78 «Бетоны. Метод определения плотности», ГОСТ 18105-2010 «Бетоны. Правила контроля и оценки прочности», ГОСТ 10180 – 2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 25192 – 2011 «Бетоны. Классификация и общие технические требования», ГОСТ 26633 – 2012 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия», ГОСТ 31914 – 2012 «Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества», ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона», ГОСТ 12730.3 – 78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

2.6. Испытание готовых изделий и конструкций

Испытания готовых изделий и конструкций проходили на 28 сутки твердения в соответствии с ГОСТ 8824-94 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости», ГОСТ 6665-91 «Камни бетонные и железобетонные бортовые. Технические условия» и ГОСТ 17608-91 «Плиты бетонные тротуарные. Технические условия».

4. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Испытание дорожных изделий из модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй проводится с целью определения влияния модификаторов структуры бетона (гиперпластификатора, полипропиленовой фибры) на технологические и прочностные характеристики и технико – экономическую эффективность.

Рациональное проектирование составов, поэтапная загрузка компонентов смеси, контроль над их перемешиванием, правильное введение минеральных, химических добавок и фибры и выбор оптимальных способов формования и укладки являются главными факторами для получения высококачественного фибробетона с заданными свойствами.

Рекомендуемая продолжительность перемешивания бетонных смесей регламентируется согласно ГОСТ 7473-2010. Полипропиленовую фибру в смеси можно перемешивать в любом типе смесителей (принудительного или гравитационного типа), в том числе в автобетоносмесителях, при этом отсутствуют проблемы, связанные с их неравномерным распределением в смеси (образованием в смеси пучков волокон).

Для приготовления жестких смесей (П1 – Ж5) для вибропрессованных изделий микроволокна рекомендуется применять следующими способами:

1) Перемешивание фибры с сухими компонентами смеси (щебень, песок, цемент, микронаполнитель), затем введение воды затворения, водных растворов химических добавок (при расходах более 0,25 % от массы вяжущего) и окончательное смешивание до готовности. Время перемешивания фибробетонной смеси увеличивается на 15%.

2) Введение волокон осуществляется после перемешивания сухих компонентов смеси, затворения их водой и водными растворами химических добавок. После тщательного перемешивания производится введение волокна в работающий смеситель. Время смешивания также увеличивается на 15 – 20 %.

Для проведения сравнительных испытаний мелкозернистого бетона были приготовлены составы жестких смесей марки Ж4 для производства тротуарной плитки и бортового камня.

Материалы для бетонных и фибробетонных смесей представлены в таблице 1.

Таблица 1

Материалы для бетонных и фибробетонных смесей

№ п/п	Наименование компонента
1	Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ОАО «Мордовцемент»
2	Песок крупный ОАО «Хромцовский карьер» $M_k = 2,73$, $V_n = 6 \%$
3	Уплотняющая добавка Murasan BWA 16, $K=30 \%$
4	Гиперпластификатор Stachement 2061/151.2, $K=30 \%$
5	Фибра полипропиленовая $L= 18$ мм, $d = 18-20$ мкм
6	Вода водопроводная $pH = 6,9$

Расчет составов произведен по методу абсолютных объемов в соответствии с ГОСТ 27006-86 «Бетоны. Правила подбора состава», Рекомендаций по подбору составов тяжелых и мелкозернистых бетонов (к ГОСТ 27006-86) ЦИТП; Пособием по технологии формования железобетонных изделий (к СНиП 3.09.01-85) НИИЖБ; СП 130.13330.2012 «Производство сборных железобетонных конструкций и изделий. Актуализированная редакция СНиП 3.09.01-85» и

«Рекомендациями по подбору составов модифицированных мелкозернистых фибробетонов для дорожных конструкций» ФГБОУ ВО Костромская ГСХА.

Объем замеса и дозировку материалов вычислялись по прогнозируемой плотности смеси $\rho_{см}$. Материалы для смеси применялись с естественной влажностью без предварительной сушки. Приготовление смеси происходило в смесителях принудительного типа. Непосредственно перед штампованием тротуарной плитки и бортовых камней определяли влажность смеси $W_{см}$.

Степень влажности смеси $W_{см}$ определяется путем сушки порции (навески) смеси. Берут определенную массу влажной смеси ($m_{вл}$) и подвергают сушке в сушильном шкафу при температуре 105-110 °С в течение 10 мин или в специальных лабораторных сушилах в течение 5-6 мин. После испарения влаги навеску вновь взвешивают. Фиксируют массу смеси после сушки ($m_{сух}$). Влажность смеси $W_{см}$ (%) будет определяться по формуле 2:

$$W_{см} = \frac{m_{вл} - m_{сух}}{m_{сух}} \cdot 100 \quad (2)$$

Максимальное значение влажности смеси составляет 8 %. Превышение данного показателя приводит к налипанию смеси к формам и прессам в процессе виброштампования. Низкая влажность приводит к разрыхлению структуры и ухудшению уплотнения смеси.

Готовые изделия хранились в заводских условиях в помещении с температурой 18 – 22 °С.

Прочностные и эксплуатационные характеристики контрольного состава бетона и модифицированных бетонов с полипропиленовой фиброй определялись по образцам, выпиленным из готовых изделий, с ребром 7 см для тротуарной плитки и 10 см для бортового камня.

Прочностные и эксплуатационные свойства включали в себя следующие параметры:

- прочность при сжатии R_B ;
- класс бетона по прочности при сжатии B ;
- прочность на растяжение при изгибе R_{tb} ;
- класс бетона по прочности на растяжение при изгибе B_{tb} ;
- прочность изделия (максимальная разрушающая нагрузка) R_{max} ;
- контрольная нагрузка по ширине раскрытия трещины R_{TR} ;
- водопоглощение бетона по массе W_m ;
- цена 1 м³ бетона или модифицированного фибробетона.

Составы, технологические, прочностные и эксплуатационные свойства бетонов и фибробетонов представлены в таблицах 2, 3, 4 и 5.

Таблица 2

**Составы и технологические свойства бетонных и фибробетонных смесей
для производства тротуарной плитки**

№ п/п	Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	П Ц	Ф _{пп} , кг/м ³	Д _ж , л (% от Ц)	В _{общ} л	В Ц	ρ _{см} , кг/м ³	W _{см} , %
1	620,9	1692,4	2,73	0	0,55 (0,04)	155,1	0,25	2468,5	7,4
2	466,9	1783,2	3,82	1	3,89 (0,25)	168,4	0,361	2420,7	7,93
3	472,1	1803,1	3,82	0,9	3,11 (0,2)	159,4	0,338	2436,5	7,1

Таблица 3

**Прочностные и эксплуатационные свойства бетонов и фибробетонов
для производства тротуарной плитки**

№ п/п	R _{max} , кг*с	R _{тр} , кг*с	R _{тб} , МПа	В _{тб} , МПа	R _в , МПа	В, МПа	W _м , %	Цена, руб./м ³
1	1270	889	3,82	3,0	34,98	27,5	3,5	3007,67
2	1680	1176	4,52	3,6	29,45	25,0	3,1	2997,27
3	1350	945	4,06	3,2	27,83	22,5	2,3	2910,52

Таблица 4

**Составы и технологические свойства бетонных и фибробетонных смесей
для производства бортового камня**

№ п/п	Ц, кг/м ³	П, кг/м ³	П Ц	Ф _{пп} , кг/м ³	ГП _ж , л (% от Ц)	В _{общ} л	В Ц	ρ _{см} , кг/м ³	W _{см} , %
1	651,7	1672,1	2,56	0	1,82 (0,08)	152,6	0,234	2477,1	7,4
2	579,5	1694,1	2,92	0,5	1,93 (0,1)	166,9	0,288	2441,7	6,75
3	578,9	1692,5	2,92	0,9	1,92 (0,1)	166,7	0,288	2441,2	7,3

Таблица 5

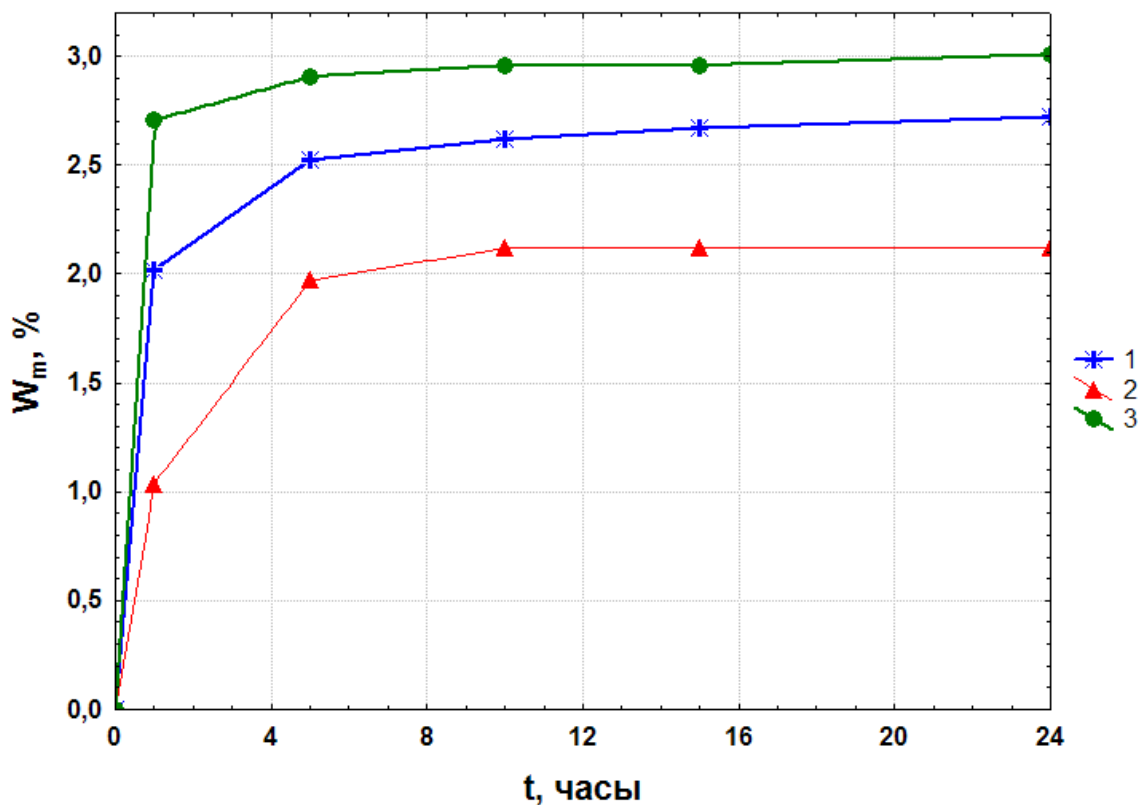
**Прочностные и эксплуатационные свойства бетонов и фибробетонов
для производства бортового камня**

№ п/п	R _{max} , кг*с	R _{тр} , кг*с	R _{тб} , МПа	В _{тб} , МПа	R _в , МПа	В, МПа	W _м , %	Цена, руб./м ³
1	2780	1946	5,12	4,0	36,85	30,0	2,4	3128,34
2	2630	1841	5,08	4,0	38,32	30,0	2,1	3023,32
3	2350	1645	5,27	4,2	36,72	30,0	1,9	3111,65

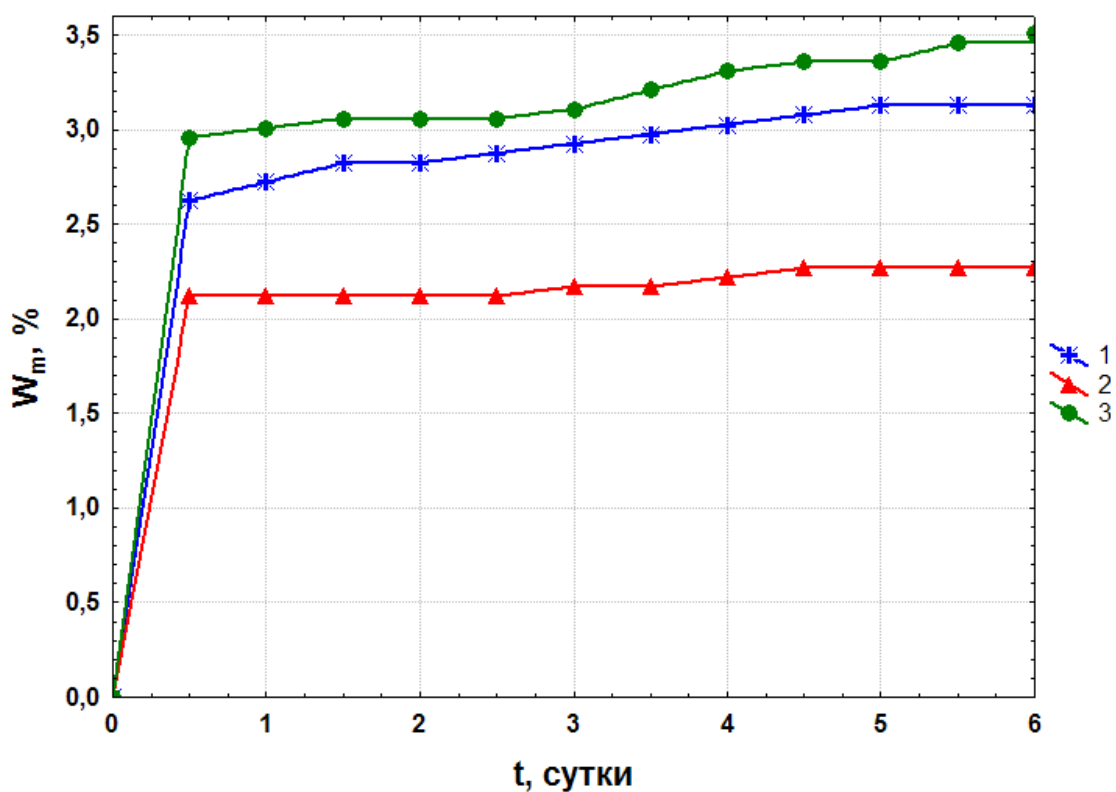
Для определения водопоглощения контрольных и модифицированных составов бетонов и фибробетонов образцы полностью погружают в воду так, чтобы уровень жидкости был выше верхней грани образцов не менее чем на 20 мм.

Кинетика водопоглощения образцов проанализирована в течение 24 часов и 6 суток водонасыщения на рисунках 1, 2, 3 и 4.

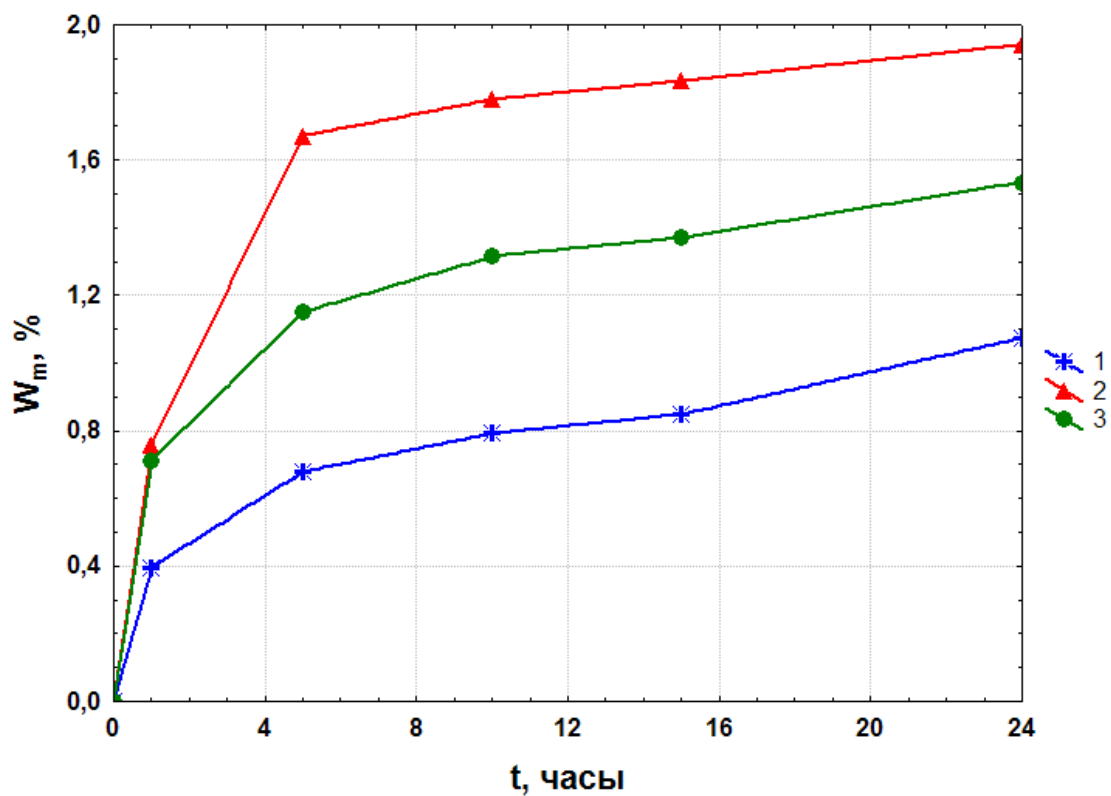
Кинетика водопоглощения образцов в течение 24 часов (составы для тротуарной плитки)



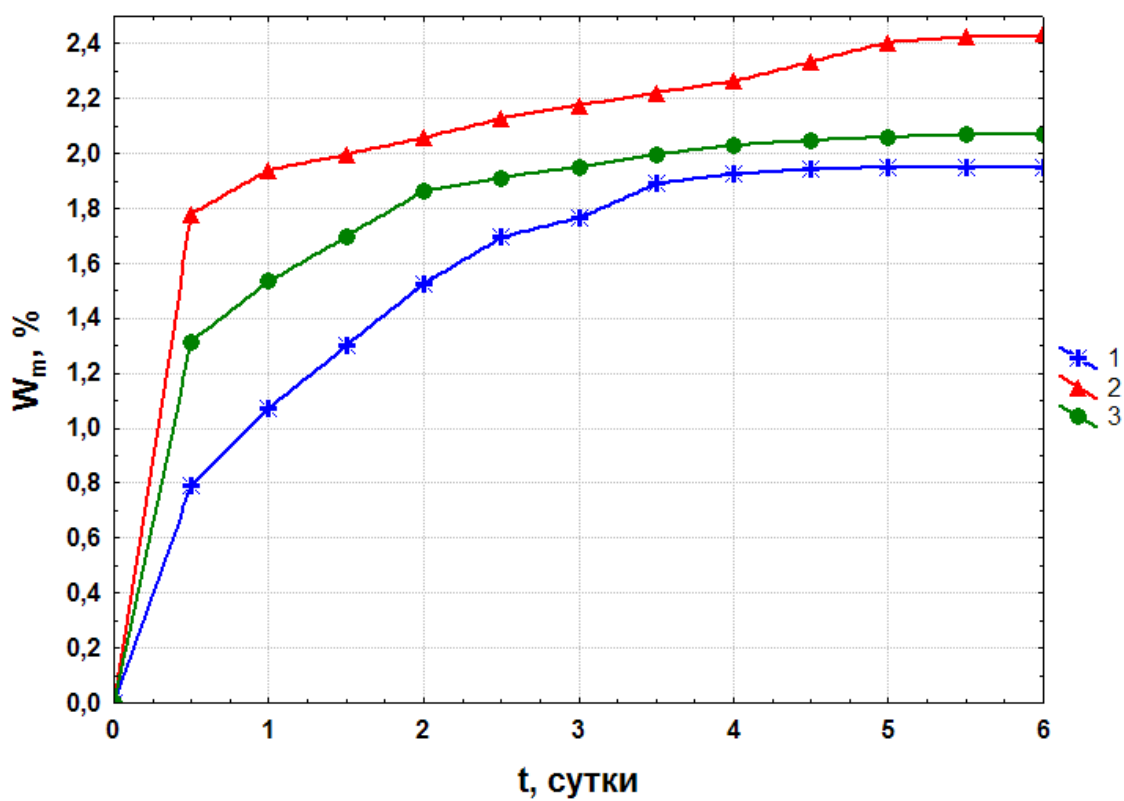
Кинетика водопоглощения образцов в течение 6 суток (составы для тротуарной плитки)



Кинетика водопоглощения образцов в течение 24 часов (составы для бортового камня)



Кинетика водопоглощения образцов в течение 6 суток (составы для бортового камня)



5. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Составы модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй для производства тротуарной плитки в сравнении с контрольным составом имеют следующие преимущества:

- экономия цемента до 24 % на 1 м³;
- водопоглощение изделия меньше на 35 %;
- восприятие разрушающей нагрузки выше на 32 %;
- прочность на растяжение при изгибе выше на 18 %;
- экономический эффект составил 97,15 руб./м³.

2. Составы модифицированного мелкозернистого бетона с полипропиленовой фиброй для производства бортового камня в сравнении с контрольным составом имеют следующие преимущества:

- экономия цемента до 13 % на 1 м³;
- водопоглощение изделия меньше на 26 %;
- прочность при сжатии выше на 4 %;
- прочность на растяжение при изгибе выше на 5 %;
- экономический эффект составил 105,02 руб./м³.

3. Применение составов модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй обусловлено технико – экономической эффективностью по следующим параметрам:

- повышение прочности на ранних сроках твердения;
- экономия энергозатрат в зимнее время;
- увеличение оборачиваемости опалубки и оборудования;
- увеличение сроков эксплуатации;
- увеличение межремонтного ресурса изделий и конструкций.