

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«Кабардино-Балкарский государственный университет
им. Х.М. Бербекова»

На правах рукописи



Шогенова Фатима Мухамедовна

**ТЕПЛООГНЕЗАЩИТНЫЕ
ФИБРОГИПСОЦЕМЕНТОВЕРМИКУЛИТОБЕТОННЫЕ
И РАСТВОРНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ
ВУЛКАНИЧЕСКОГО ПЕПЛА И ПЕМЗЫ**

Специальность

2.1.5 Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
д.т.н., профессор,
советник РААСН
Т.А. Хежев

Нальчик – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	12
1.1. Пожарная безопасность зданий	12
1.2. Способы обеспечения требуемой огнестойкости строительных конструкций.....	15
1.3. Вяжущие материалы для огнезащитных бетонов и растворов	20
1.3.1. Гипс строительный.....	20
1.3.2. Комбинированные гипсовые вяжущие.....	20
1.3.3. Повышение водостойкости модификаторами.....	22
1.3.4. Повышение уровня технических свойств материалов на основе гипсовых вяжущих фиброармированием.....	23
1.4. Выбор вида волокон для армирования гипсобетонных композитов..	27
1.5. Анализ сырьевой базы заполнителей и перспектив использования техногенных отходов.....	30
Выводы по первой главе	36
Глава 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ.....	38
2.1. Характеристика используемых материалов.....	38
2.2. Методика исследования.....	42
Глава 3. ФИБРОГИПСОЦЕМЕНТНОБЕТОННЫЕ КОМПОЗИТЫ С ВУЛКАНИЧЕСКИМ ПЕПЛОМ.....	47
3.1. Влияние рецептурных факторов на свойства гипсопеплоцементнобетонного композита.....	47
3.2. Свойства фиброгипсопеплоцементнобетонных композитов.....	54
3.3. Влияние технологических факторов на свойства фиброгипсоцементнопеплобетонного композита	66
Выводы по третьей главе	72

Глава 4. ФИБРОГИПСОЦЕМЕНТНОВЕРМИКУЛИТОБЕТОННЫЕ ТЕПЛО ОГНЕЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ВУЛКАНИЧЕСКИМ ПЕПЛОМ И ПЕМЗОЙ.....	74
4.1. Состав и свойства фиброгипсоцементновермикулитобетонных композитов	74
4.2. Огнезащитные свойства фиброгипсоцементновермикулитобетонных композитов с вулканическим пеплом и пемзой	94
4.3. Влияние технологических факторов на свойства фиброгипсоцементновермикулитобетонных композитов с применением вулканических пород	105
Выводы по четвертой главе	113
Глава 5. ТЕПЛО ОГНЕЗАЩИТНЫЕ ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ.....	116
5.1. Составы и свойства теплоогнезащитных штукатурных растворов на основе вулканического пепла и пемзы.....	116
5.2. Составы и свойства теплоогнезащитных штукатурных растворов на основе вспученного вермикулита, вулканического пепла и пемзы	130
5.3. Техничко-экономическая эффективность использования штукатурных растворов на основе вспученного вермикулита, вулканического пепла и пемзы.	149
Выводы по пятой главе	152
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	154
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. При проектировании и строительстве зданий I и II степени огнестойкости к ним предъявляются повышенные требования, особенно при высоте жилых зданий более 28 метров. Одной из тенденций современного гражданского строительства, особенно в условиях плотной городской застройки, является рост этажности возводимых зданий, в результате в 2024 г. более 71 % вводимой площади составили здания высотой 13 и более этажей, в т.ч. высотные. Значительный ущерб от пожаров, число которых в 2024 г. превысило 280 тыс., предопределяет актуальность разработки новых и совершенствования известных конструктивных решений и материалов, обеспечивающих снижение пожарной опасности зданий. Обеспечение пожарной безопасности (огнезащиты) предусматривает, наряду с реализацией специальных конструктивных решений, снижение пожарной опасности применяемых материалов и конструкций, а требуемая огнестойкость различных конструкций эффективно обеспечивается применением огнезащитных составов в виде облицовок, экранов и штукатурных покрытий, наносимых набрызгом или торкретированием. Стоимость мероприятий по снижению пожарной опасности зданий может составлять до 10 % их стоимости, а обеспечению огнестойкости строительных конструкций до 30 % их стоимости, в связи с чем являются актуальными исследования в области разработки эффективных составов для производства бетонов и строительных растворов на основе местного природного и техногенного сырья в сочетании с эффективными многокомпонентными вяжущими и дисперсным армированием различными волокнами для огнезащитных облицовок, экранов и штукатурных покрытий, характеризующихся низкими показателями стоимости и трудоемкости в сочетании с технологичностью, декоративностью, атмосферостойкостью и, при определенных условиях, акустическими функциями.

Степень разработанности темы исследований. Огнезащитные изделия и штукатурки на основе различных вяжущих и вспученных вермикулита и перлита с добавкой волокон асбеста и других широко применяются для огнезащиты различных строительных конструкций. Повышенная трещиностойкость композитов

на основе вспученного вермикулита и высокая его стоимость определяют актуальность поиска частичной либо полной замены вспученного вермикулита местными материалами. Комбинированные гипсовые вяжущие являются эффективными материалами и применяются для производства материалов различного назначения, что определяет актуальность исследований по совершенствованию их рецептур с использованием местного сырья для производства дисперсно-армированных огнезащитных композитов.

Рабочая гипотеза. Рациональные огнезащитные составы могут быть разработаны на основе выявленных закономерностей влияния рецептурных и технологических факторов на основные строительные-технические свойства дисперсно-армированных огнезащитных композитов на основе местного сырья, комбинированного гипсового вяжущего и химических добавок.

Цель работы и задачи исследований. Целью диссертационной работы является выявление общих закономерностей и получение количественных зависимостей влияния вида заполнителей, минеральных добавок, состава комбинированного вяжущего гипс + портландцемент + минеральные + химические добавки в сочетании с дисперсным и полидисперсным армированием при различных технологиях приготовления смеси и формования композитов на показатели: технологические свойства смесей, смеси, средней плотности, прочности при сжатии и изгибе, коэффициента размягчения и теплофизические показатели огнезащитных композитов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить **следующие задачи:**

- выявить закономерности изменения показателей прочности и водостойкости композита в зависимости от состава комбинированного гипсоцементного и гипсопеплоцементного вяжущего;
- выявить влияние технологических параметров приготовления смеси и формования изделий из огнезащитных составов на эксплуатационные показатели дисперсно-армированных композитов;

- выявить влияние параметров дисперсного и полидисперсного армирования на эксплуатационные показатели огнезащитных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих и вулканических пород Кабардино-Балкарии;

- оценить целесообразность и эффективность применения воздухововлекающих и пластифицирующих добавок, в т.ч. комплексных модификаторов, на эксплуатационные показатели огнезащитных дисперсно-армированных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих и вулканических пород Кабардино-Балкарии;

- разработать рекомендации по рецептурам и способам производства огнезащитных дисперсно-армированных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих и вулканических пород Кабардино-Балкарии, оценить их соответствие нормативным требованиям и экономическую эффективность.

Объектом исследования являются рецептуры и свойства огнезащитных дисперсно-армированных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих, вспученного вермикулита, химических добавок и вулканических пород Кабардино-Балкарии.

Предметом исследования являются закономерности изменения в зависимости от рецептурных и технологических факторов основных эксплуатационных свойств огнезащитных дисперсно-армированных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих, вспученного вермикулита, химических добавок и вулканических пород Кабардино-Балкарии.

Научная новизна работы:

- развиты научные представления о закономерностях изменения и получены зависимости изменения показателей прочности и водостойкости гипсопепловых и гипсопемзовых дисперсно-армированных композитов на основе вулканических пород при введении в состав рациональной доли портландцемента;

- выявлены закономерности влияния параметров приготовления дисперсно-армированных смесей на основе комбинированных гипсовых вяжущих, вспученного вермикулита, химических добавок, вулканических пород, а также

параметров формования изделий из них на основные эксплуатационные показатели, получены зависимости изменения свойств композитов от рецептурных факторов;

- выявлены закономерности влияния и получены количественные показатели эффективности армирования высокомодульными и низкомодульными дисперсными волокнами, а также полидисперсного армирования на прочностные свойства огнезащитных композитов;

- уточнены зависимости предела прочности при сжатии от средней плотности, параметров дисперсного армирования, зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии разработанных огнезащитных композитов.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в:

- развитии научных представлений о влиянии рецептуры комбинированных гипсовых вяжущих на основные эксплуатационные показатели их качества;

- уточнении закономерностей влияния параметров дисперсного и полидисперсного армирования на строительно-технические свойства огнезащитных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих;

- выявленных закономерностях влияния технологических параметров приготовления смеси и формования изделий на их строительно-технические свойства;

- полученных новых данных о влиянии вида вулканических пород в составе огнезащитных композитов на их показатели прочности и водостойкости;

- развитии научных представлений о влиянии воздухововлекающей и полифункциональной добавок на технологические свойства смесей и огнезащитные свойства композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих и вулканических пород.

Практическая значимость работы заключается в том, что:

- предложены уравнения, описывающие зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии огнезащитных композитов в зависимости от рецептурных и технологических факторов;

- выявлены закономерности изменения пределов огнестойкости слоистых конструкций по критериям прочности и теплопроводности в зависимости от средней плотности, толщины слоя и состава огнезащитных композитов;

- предложены уравнения зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры огнезащитных композитов для расчетов температурных полей при оценке пределов огнестойкости конструкций расчетными методами;

- предложена методика экспериментальной оценки предела огнестойкости по критериям прочности и теплопроводности огнезащитных композитов;

- предложены рекомендации по производству штукатурных составов огнезащитных композитов, в т.ч. производимых по технологии сухих строительных смесей.

Методология и методы исследования. Методология работы основывается на анализе и обобщении требований нормативных документов, трудов отечественных и зарубежных исследователей по тематике, связанной с оценкой влияния рецептурных и технологических факторов на строительные-технические свойства дисперсно- и полидисперсно-армированных огнезащитных композитов.

При выполнении экспериментальных исследований в лаборатории применялось современное высокотехнологичное оборудование, методы исследований и испытаний, регламентированные нормативными документами в сочетании с исследовательскими методиками, методы моделирования и математического планирования эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

- установленные закономерности и полученные зависимости изменения показателей прочности и водостойкости комбинированных гипсовых вяжущих в зависимости от вида и дозировки вулканической породы и портландцемента;

- установленные закономерности и полученные зависимости влияния параметров дисперсного и полидисперсного армирования на строительные свойства огнезащитных композитов на основе комбинированных гипсовых вяжущих;

- установленные закономерности влияния способов приготовления смеси, формования изделий или нанесения составов огнезащитных композитов на их эксплуатационные показатели;

- полученные численные значения показателей прочности и водостойкости, коэффициентов теплопроводности и теплоемкости в зависимости от рецептурных и технологических факторов и условий эксплуатации;

- результаты оценки экономической эффективности огнезащитных композитов на основе местного сырья Кабардино-Балкарии.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена комплексом проведенных исследований с использованием сертифицированного и метрологически поверенного современного лабораторного оборудования, стандартных средств измерений и методов научных исследований, непротиворечивостью полученных результатов и выводов общепризнанным положениям строительного материаловедения и результатам исследований других авторских коллективов.

Апробация результатов работы. Основные результаты выполненных исследований докладывались и обсуждались на Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПЕРСПЕКТИВА – 2020» (Нальчик, КБГУ, 2020); Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПЕРСПЕКТИВА – 2021» (Нальчик, КБГУ, 2021); VI-ой Международной научно-технической конференции «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД 2021) (Нальчик, КБГУ, 2021); Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПЕРСПЕКТИВА – 2022» (Нальчик, КБГУ, 2022); Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПЕРСПЕКТИВА – 2023» (Нальчик, КБГУ, 2023); Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПЕРСПЕКТИВА – 2024»

(Нальчик, КБГУ, 2024); Международная научно-практическая конференция «Наука, образование, общество» (Тамбов, 2025); Всероссийская научно-практическая конференция, посвященная 75-летию д.т.н., профессора Абакарова А.Д. «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (Махачкала, ДГТУ, 2025); Международной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «ПЕРСПЕКТИВА – 2025» (Нальчик, КБГУ, 2025).

Внедрение результатов исследований. В ООО «Спас-сектор» разработанные фиброгипсоцементновермикулитовые огнезащитные растворы с применением вулканического пепла и пемзы используются для огнезащиты строительных конструкций.

В ФИРМЕ «СТРОЙИНДУСТРИЯ» ООО разработанные теплоогнезащитные фиброгипсоцементновермикулитобетонные композиты с применением вулканического пепла и пемзы используются для огнезащиты строительных конструкций. Из фиброгипсоцементновермикулитобетонного композита со средней плотностью 480-590 кг/м³ изготавливаются огнезащитные плиты толщиной 20-25 мм.

Публикации. Основные положения диссертации изложены в 15 работах, в том числе: 5 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, 1 статья в изданиях, входящих в международную реферативную базу данных и систему цитирования Scopus, получены 3 патента на изобретения.

Личный вклад автора состоит в обосновании рабочей гипотезы, постановке цели и задач исследования, в теоретическом анализе данных по проблеме исследования, в планировании и реализации экспериментов по исследованию влияния рецептурных факторов на свойства огнезащитных композитов, обработке и анализе результатов исследований, формулировке научной новизны, выводов и заключения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 177 наименований и приложений. Изложена

на 176 страницах текста формата А4, шрифт Times new roman 14, 1,5 интервала, содержит 84 рисунка и 68 таблиц.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности 2.1.5 Строительные материалы и изделия:

п. 9 «Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий *с использованием местного сырья* и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений».

п. 10 «Разработка новых и совершенствование существующих методов *повышения стойкости строительных материалов*, изделий и конструкций в условиях воздействия физических, химических и биологических *агрессивных сред* на всех этапах жизненного цикла».

п. 15 «Развитие теоретических основ и технологии получения *вяжущих композиций и сухих строительных смесей* различного назначения».

Глава 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Пожарная безопасность зданий

Одной из тенденций современного гражданского строительства является рост этажности возводимых зданий, особенно в условиях плотной городской застройки. В 2019 г. средняя этажность жилищного строительства составила 17,7 этажа на 1 м² возводимого здания. Средняя этажность по некоторым регионам составляет [1]:

- Ростовская область – 19,7;
- Краснодарский край – 17,7;
- Ставропольский край – 13,2;
- Чеченская республика – 12,4;
- Республика Дагестан – 12,3;
- Республика Ингушетия – 10,6;
- Кабардино-Балкарская республика – 7,7.

Более 71 % вводимой площади приходится на здания высотой 13 и более этажей, в т.ч. высотные [1]. При возведении подобных зданий основным конструкционным материалом является железобетон.

По данным [2] за 9 месяцев 2024 г. в РФ произошло 279 313 пожаров, на которых погибло 5 302 человека. Зарегистрированный материальный ущерб составил 13,2 млрд. рублей. Несмотря на значительно меньшую этажность возводимых объектов в Кабардино-Балкарской республике относительно других приведенных регионов, увеличения количества пожаров в 2024 г. в сравнении с 2023 г. по данным [2] предопределяет актуальность разработки новых и совершенствования известных конструктивных решений и материалов, обеспечивающих снижение пожарной опасности зданий. Очевидно, что в связи с указанными фактами исследования в области обеспечения огнестойкости строительных конструкций являются весьма актуальными. При проектировании и строительстве к зданиям I и II степени огнестойкости предъявляются повышенные требования

[3], особенно для жилых зданий высотой более 28 метров и других зданий с количеством этажей более девяти [4, 5].

Согласно [6] «пожарную опасность конструкции характеризуют наличием теплового эффекта (но не его значением) от горения материалов образца..., наличием пламенного горения газов, выделяющихся при термическом разложении материалов образца..., наличием горящего расплава..., размером повреждения образца в контрольной зоне».

Согласно [7] установлены основные виды предельных состояний конструкций по огнестойкости: потеря несущей способности вследствие обрушения конструкции или возникновения предельных деформаций (R), потеря целостности в результате образования в конструкциях сквозных трещин или отверстий, через которые на необогреваемую поверхность проникают продукты горения или пламя (E), потеря теплоизолирующей способности вследствие повышения температуры на необогреваемой поверхности конструкции до предельных для данной конструкции значений (I).

Безусловно, любой пожар неповторим, но при этом есть общие параметры, по которым создана модель стандартного пожара [6]. Стандартная зависимость «температура-время» при пожаре впервые предложена Инбергом С.И. в 1928 г. [8] и выражается уравнением:

$$T - T_0 = 345 \cdot \lg(8\tau + 1). \quad (1.1)$$

В [6] для определения режима при испытаниях на огнестойкость уравнение имеет вид:

$$T - T_0 = 345 \cdot \lg(8\tau + 1). \quad (1.2)$$

В ф. (1.1) и (1.2):

τ – время от начала испытания, мин; T_0 – начальная температура (окружающая среда), °С.

Обеспечение пожарной безопасности (огнезащиты) предусматривает:

- применение специальных объемно-планировочных решений;

- применение противопожарных устройств;
- снижение пожарной опасности материалов и конструкций.

По данным [9-11] стоимость таких мероприятий от полной стоимости зданий составляет до 10 % и до 30 % от стоимости защищаемых конструкций, подлежащих огнезащите. Для обеспечения требуемого предела огнестойкости конструкций [12] применяется огнезащита, основное назначение которой заключается в ограничении распространения огня по конструктивным элементам здания. Требуемая огнестойкость железобетонных конструкций обеспечивается использованием:

- теплозащитных и теплопоглощающих экранов;
- реализацией специальных конструктивных решений;
- применением огнезащитных составов.

По данным [13, 14] применение теплоизоляционных материалов для огнезащитного слоя позволяет увеличить предел огнестойкости, в зависимости от толщины слоя:

- до 12 мин при использовании пенопласта (50 мм);
- до 54 мин при использовании фенопласта с перлитом (50 мм);
- до 240 мин при использовании фибролита (75 мм).

Весьма эффективным огнезащитным материалом является асбестокартон, обеспечивающий при относительно небольшой толщине огнезащитного слоя повышение предела огнестойкости в зависимости от вида конструкции до 2 раз. Очевидно, что применение материалов, относящихся к группе негорючих, в качестве огнезащитного слоя, обеспечивает ряд преимуществ, в частности, исключает образование вредных токсичных элементов при их горении.

Известны следующие способы огнезащиты строительных конструкций [15, 16]:

- обкладка кирпичом или обетонирование, достоинство – простота, низкая стоимость, недостатки – высокие материало- и трудоемкость, малая ремонтпригодность;

- экраны и облицовки из плитных или листовых материалов, достоинства – долговечность, ремонтпригодность, технологичность, декоративность, недостатки – толщина слоя, паропроницаемость;

- вспучивающиеся покрытия, достоинства – малая толщина и трудоемкость, недостаток – относительно низкий эффект;

- штукатурные покрытия, в т.ч. наносимые набрызгом или торкретированием, достоинства – низкая стоимость и трудоемкость, технологичность, декоративность, атмосферостойкость, недостаток – малая ремонтпригодность.

По данным [17, 18] к широко применяемым способам обеспечения огнезащиты (повышения предела огнестойкости) относятся обетонирование и оштукатуривание поверхности. Такие решения технологичны, относительно недороги, особенно при их производстве на основе местного сырья, в т.ч. техногенных отходов, и в принципе, наряду с огне- и теплозащитными функциями могут обеспечивать достаточно высокие эстетические показатели (например, декоративные огнезащитные штукатурки). По данным [19] к эффективным способам огнезащиты могут быть отнесены плиты и огнезащитные штукатурки на основе строительного гипса или портландцемента с заполнителем из вспученного вермикулита.

1.2. Способы обеспечения требуемой огнестойкости строительных конструкций

Огнестойкость конструкции зависит от ее вида, геометрии, используемых материалов, критериев огнестойкости, параметров пожара. В качестве основного критерия принимается несущая способность. В качестве примера на рис. 1.1 показано влияние требуемого предела огнестойкости на требуемую толщину плиты перекрытия по данным [20].

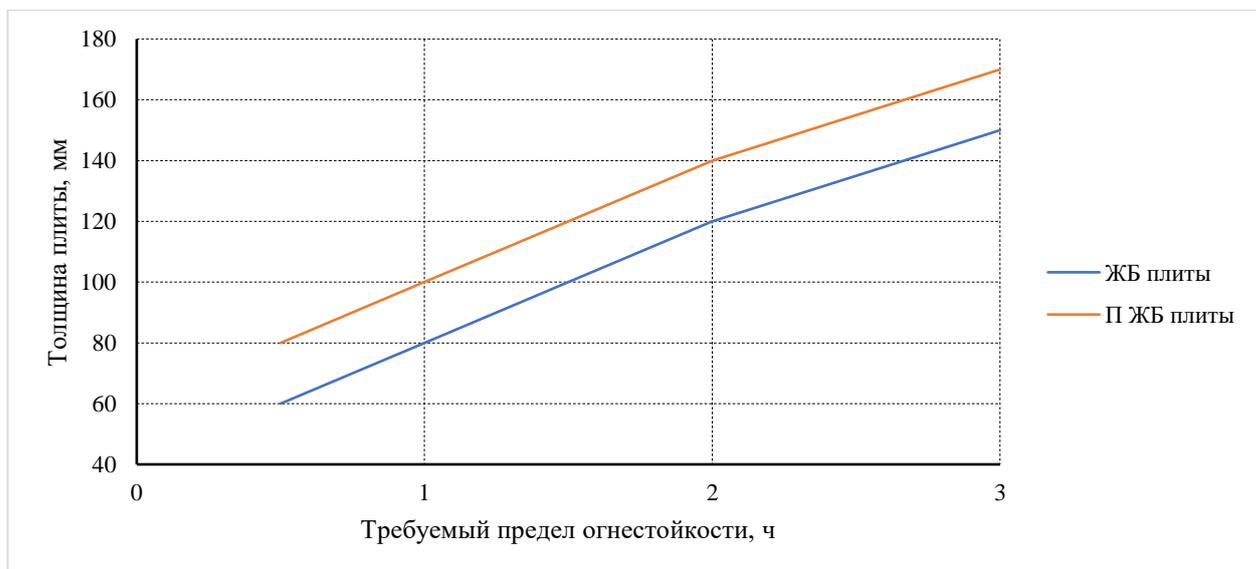


Рисунок 1.1 – Влияние требуемого предела огнестойкости на требуемую толщину плиты

ЖБ плиты, П ЖБ плиты – соответственно обычно армированная и предварительно-напряженная плита

Согласно [21] допускается упрощенный расчет огнестойкости по критерию несущей способности, при этом за критическую температуру принимается для бетонов на силикатных заполнителях 500 °С, на карбонатных 600 °С. Влияние продолжительности воздействия стандартного пожара на глубину прогрева различных конструкций до критической температуры зависит от вида конструкции, большая скорость прогрева (меньший предел огнестойкости) имеет место в балке, и вид заполнителя – на карбонатных заполнителях время достижения критической температуры возрастает, т.е. рецептурные факторы оказывают влияние на предел огнестойкости. На рисунке 1.2 показано влияние продолжительности воздействия стандартного пожара на глубину прогрева различных конструкций до критической температуры для бетонов на силикатных заполнителях и карбонатных заполнителях по данным рисунка 8.2 [21] и по данным [20, 22] для толщины защитного слоя в зависимости от требуемого предела огнестойкости для плит в зависимости от класса арматурной стали.

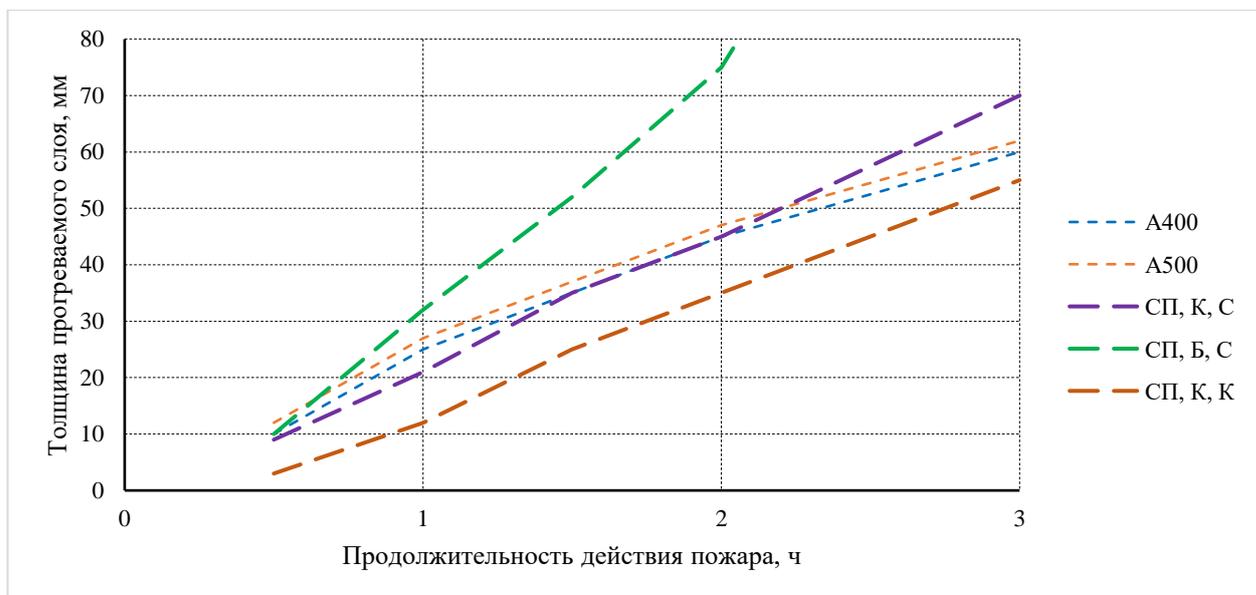


Рисунок 1.2 – Влияние продолжительности воздействия стандартного пожара на глубину прогрева различных конструкций до критической температуры А400, А500 – по данным [20, 22]; СП – по рис. 8.2 [21], К – колонна 400х400 мм, Б – балка толщиной 200 мм, С – силикатные заполнители, К – карбонатные заполнители

По данным [23] при температурах 300, 500, 700 °С призмная прочность тяжелого бетона составляет 80, 60 и 25 % относительно начальной. Согласно табл. 5.1 [21] при температурах 300, 500, 700 и 800 °С значения коэффициентов условий работы на сжатие составляют 0,95, 0,8 (0,85), 0,2 (0,3) и 0,1 (0,15) соответственно (в скобках – для бетонов на карбонатных заполнителях). Таким образом, при воздействии пожара происходит достаточно быстрый прогрев и закономерно снижение уровня конструктивных свойств бетона, что приводит к снижению несущей способности. Повышение предела огнестойкости за счет увеличения толщины защитного слоя в большинстве случаев будет нерациональным в связи со значительным ростом размеров сечения.

Еще в большей степени проблема огнезащиты актуальна для тонкостенных, в т.ч, армоцементных и металлических конструкций. Так, согласно [24] у не защищенных снизу армоцементных конструкций толщиной 2 см предел огне-

стойкости составил всего от 30 до 36 мин. Совершенствование способов повышения огнестойкости подобных конструкций в связи с вышеизложенным представляет актуальную задачу. Среди известных способов [15, 16] перспективным представляется применение плитных и листовых изделий и огнезащитных штукатурок на основе строительного гипса, портландцемента и вспученного вермикулита. В этом случае появляется возможность сочетания огнезащитных, теплозащитных и акустических функций [14].

Огнезащитные плиты характеризуются средней плотностью от 300 до 1500 кг/м³, производятся с применением вспученного вермикулита, перлита, керамзита, асбеста, минеральной ваты, стекло и базальтового волокон. Например, по данным [25] изготовленные методом горячего прессования с применением вспученного вермикулита и минерального вяжущего плиты «Термакс» характеризуются средней плотностью 650 кг/м³ и 350 кг/м³ при значении предела прочности при изгибе от 3,5 до 4,5 МПа и обеспечивают предел огнестойкости металлических конструкций до 1,5 ч.

Тенденция применения асбеста, вспученного вермикулита и перлита, минеральных волокон при производстве огнезащитных покрытий получила достаточно широкое применение. Например, покрытия ОФП–ММ со средней плотностью не более 300 кг/м³ для огнезащиты эксплуатируемых внутри помещений стальных конструкций [26] на основе жидкого стекла, асбеста III - V сортов, и нефелиновый антипирен обеспечивает при толщине огнезащитного слоя до 50 мм предел огнестойкости до 3 ч. Известно более 6 модификаций покрытия. Но в зарубежной практике жидкостекольные составы не применяются, поскольку обладают, наряду с определенными преимуществами, значительными недостатками, связанными с высокой щелочностью жидкого стекла и его низкой водостойкостью, исключающей применение для защиты конструкций при атмосферных воздействиях. Кроме того, по данным [27], при огневом воздействии происходит вспучивание и плавление покрытия на жидком стекле с последующим разрушением. Но при средней плотности огнезащитного покрытия 660 кг/м³ на

портландцементе с добавлением 10 % жидкого калиевого стекла предел огнестойкости металлических колонн составил до 3,5 ч, а покрытие из асбестовермикулита на портландцементе практически не разрушилось при огневом воздействии [27, 28].

Давнюю историю имеют теплоизоляционные изделия [29, 30] с коэффициентом теплопроводности – 0,09–0,11 Вт/(м·°С) на магнезиальном, глиноземистом и портландцементе из вермикулитобетона со средней плотностью до 500 кг/м³ и пределом прочности при сжатии до 0,5 МПа. Исследования позволили разработать огнезащитные покрытия, и уже более полувека для огнезащиты применяются портландцементные вермикулитовые и перлитовые штукатурки с теплоизоляционными свойствами [31, 32].

Огнезащитные штукатурки со средней плотностью до 700 кг/м³ и пределом прочности при изгибе до 1 МПа при коэффициенте теплопроводности 0,14 Вт/(м·°С) получены на основе вспученного вермикулита и перлита с добавкой волокон асбеста и гранул минеральной ваты 6 – 8 мм с насыпной плотностью не более 150 кг/м³ [33]. В качестве вяжущего использован быстротвердеющий портландцемент – 500.

Для огнезащиты армоцемента применялись огнезащитные вермикулитовые растворы на пуццолановом портландцементе и жидком стекле с волокнами асбеста и пенообразователем, наносимые напылением или вручную [31]. В качестве критерия огнезащитных свойств использовано время нагрева до критической температуры 500 °С. Доказана высокая огнезащитная эффективность вермикулитовых растворов [34, 35]. На основе комбинированных вяжущих: портландцемент, гипс строительный, жидкое стекло, глиноземистый цемент в сочетании с различными добавками и вспученным вермикулитом и перлитом в качестве пористых заполнителей разработаны эффективные огнезащитные составы для защиты металлических конструкций [36].

Отмечено, что огнезащитные составы на основе вермикулита имеют повышенную трещиностойкость. Огнезащитные вермикулитовые штукатурки при

толщине огнезащитного слоя 20 мм и его массе до 12 кг/м² не приводят к значительному утяжелению элементов конструкций и обеспечивают высокую огнестойкость [14, 19, 37, 38]. Поскольку вермикулит имеет высокий коэффициент звукопоглощения [34], золотисто-серебристый цвет и хорошие теплоизоляционные свойства [39], наряду с основным функциональным назначением такое покрытие улучшает акустические, теплоизоляционные и декоративные характеристики при нанесении на армоцементные конструкции.

По данным [38] вследствие высокой, до 1200–1280 °С огнеупорности туфового песка и вулканического пепла, их применение в сочетании с пылевидными фракциями отходов пиления туфа и вулканическим пеплом делает эти материалы перспективными для применения в качестве заполнителей и активных минеральных добавок для тепло- и огнезащитных растворов и бетонов.

1.3. Вяжущие материалы для огнезащитных бетонов и растворов

1.3.1. Гипс строительный

В соответствии с [40] производятся вяжущие гипсовые марок от Г-2 до Г-25 быстро, нормально и медленно твердеющие с различной тонкостью помола. Вяжущие гипсовые широко применяются в различных отраслях, в т.ч. при «производстве штукатурных работ» [40]. Одним из актуальных направлений является совершенствование гипсовых вяжущих на основе «современных теорий структурообразования композиционных материалов» [41]. Производство гипсовых вяжущих осуществляется как из природного сырья (гипсовый камень, ангидрит), так и из техногенных отходов (фосфогипс, фторангидрит, титаногипс, витаминный гипс, борогипс и др.) [42-52].

1.3.2. Комбинированные гипсовые вяжущие

Существенным недостатком гипсовых вяжущих является низкая водостойкость материалов и изделий на их основе. По данным [45-48, 53, 55] эффектив-

ным способом повышения водостойкости является производство комбинированных (смешанных, многокомпонентных) вяжущих, включающих гипс, портландцемент и различные активные минеральные добавки (АМД), обладающие гидравлическими свойствами, в частности, молотый гранулированный доменный шлак. Последний может вводиться и взамен портландцемента. АМД вводятся с целью стабилизации собственных деформаций вследствие образования высокосульфатной формы гидросульфоалюмината кальция (ГСАК-3, эттрингит) [47].

В качестве кислых гидравлических добавок могут быть использованы содержащие активный кремнезем природные материалы, например, трепелы, диатомиты, вулканические пеплы, туфы, трасы и техногенные отходы, например, золы и золошлаковые отходы [19]. Механизм действия добавок основан на снижении концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в поровой жидкости до уровня, при котором меняется морфология ГСАК-3 [56]. Такие вяжущие известны как гипсоцементнопуццолановые (ГЦПВ) [53-55, 57-59] и широко применяются для производства различных изделий [60]. В «среднестатистический» составе ГЦПВ содержится 50-65 % гипсового вяжущего, 20-25 % портландцемента и активная минеральная добавка – остальное [47]. Возможно использование состава гипсовое вяжущее + пуццолановый портландцемент. ГЦПВ по пределу прочности при сжатии характеризуются марками М100 и М150, сроки схватывания составляют: НС – не ранее 4 минут, КС – не позднее 20 минут. Тонкость помола по остатку на сите № 02 в зависимости от марки до 10 % или 15 %. Состав ГЦПВ подбирается по [61, 62] или для условий твердения при повышенных температурах по [19, 63].

Гипсошлакоцементные вяжущие (ГШЦВ) при «среднестатистическом» составе полуводного гипса или ангидрита, 30–50 % кислый доменный шлак, 5–8 % портландцемента для щелочной активации вяжущих свойств шлаков [19, 54, 64], 10-15 % пуццолановые добавки [19]. Возможно эффективное применение гипсоизвестковошлакового вяжущего (ГИШВ) [65].

Появление вяжущих нового поколения - водостойких гипсовых вяжущих низкой водопотребности (ВГВ), или композиционных гипсовых вяжущих (КГВ) [19], получение которых основана на механохимической активации, позволило

поднять применение материалов на основе гипсовых вяжущих на новый уровень [66-77]. Возможно производство КГВ на основе любой модификации гипсовых вяжущих в сочетании с [70]:

- кремнеземистая добавка, например, зола-уноса, керамическая пыль, отходы производства кирпича и керамических изделий, стеклобой, молотый кварцевый песок, микрокремнезем, кремнегель, силикагель и т.п.;
- портландцемент;
- суперплатифицирующая добавка;
- регуляторы схватывания и твердения;
- модификаторы, например, полимеры, загустители.

КГВ на основе гипсового вяжущего характеризуется водопотребностью вяжущего от 0,3 до 0,38, марками от М150 до М350 при коэффициенте размягчения от 0,74 до 0,86 [70]. КГВ на основе высокопрочного гипса характеризуется водопотребностью от 0,22 до 0,32, марками от М350 до М500 при коэффициенте размягчения 0,77–0,88 [19]. На основе КГВ производятся тяжелые бетоны классов В7,5–В35, мелкозернистые бетоны классов В5–В35, легкие бетоны на пористых заполнителях классов В2,5–В10 при средней плотности от 700 до 1300 кг/м³, опилкобетоны классов В2,5–В5 при средней плотности 600–900 кг/м³, пенобетоны классов В0,5–В3,5 при средней плотности 400–800 кг/м³ [19, 70].

1.3.3. Повышение водостойкости модификаторами

Одним из направлений повышения водостойкости материалов на основе гипсовых вяжущих является введение в состав смеси гидрофобизирующих добавок различного химического состава. Одним из вариантов является применение парафинсодержащих материалов, что обеспечивает, в частности, уменьшение величины водопоглощения за 2 ч до 20 раз, а после 10 мин величина водопоглощения снижается относительно гипсового материала до 40 раз. Гипсовое вяжущее с гидрофобизатором имеет прочность при сжатии не ниже 4 МПа через 2 ч, изделия обладают приемлемой морозостойкостью, характеризуются коэффициентом теплопроводности 0,30...0,54 Вт/(м*К) при средней плотности 700..1100

кг/м³. К недостаткам можно отнести сокращенные до 6 мин и 11 мин сроки схватывания. Вяжущее применяется, в частности, для получения гранул с последующим прессованием из них плит при снижении энергозатрат на сушку [78]. Прессовании под давлением до 8 МПа обеспечивает при средней плотности от 1800 до 1900 кг/м³ предел прочности при сжатии до 50, а при изгибе до 12 МПа [28], при этом величина водопоглощения через 2 ч не превышает 1,5 %. Помимо парафинсодержащих материалов применяются стеараты кальция (кальциевое мыло) при дозировке до 7%, а также ранее применялся горный воск (озокерит) в дозировке до 3 %.

Водостойкие гипсовые вяжущие обеспечивают, наряду с достоинствами традиционных гипсовых вяжущих, высокая оборачиваемость формовочного оборудования при производстве изделий, снижение себестоимости вследствие применения местного и техногенного сырья и отказа от тепловой обработки [79]. Введение в состав гипсовой смеси портландцемента, кремнезема и органоминеральных модификаторов в сочетании с механохимической активацией позволило получить эффективные штукатурные растворы для наружной отделки, характеризующиеся пределами прочности при сжатии до 15 МПа, при изгибе до 5,3 МПа, прочностью сцепления с основанием более 0,5 МПа и высокой, более 100 циклов, морозостойкостью [69]. Эффективным способом повышения строительно-технических свойств материалов на основе гипсовых вяжущих является применение ультрадисперсных алюмосиликатных добавок и углеродных наномодификаторов [80].

1.3.4. Повышение уровня технических свойств материалов на основе гипсовых вяжущих фиброармированием

Как известно, бетоны, армированные различными волокнами (фибробетоны), характеризуются повышенными показателями прочности, особенно при изгибе и растяжении, ударной стойкости и трещиностойкости. Применение фибрового (дисперсного) армирования при производстве бетонов и растворов на ос-

нове различных гипсовых вяжущих обеспечивает расширение области их эффективного применения [81, 82], при этом в объеме матрицы армирующие волокна могут иметь направленную или произвольную (хаотичную) ориентацию [83]. Поскольку прочность материалов зависит от концентрации дефектов, то с уменьшением массивности образца за счет сокращения дефектности структуры имеет место рост прочности, например, стеклянных волокон, до 30 раз [84]. Волокна карбида и нитрида кремния, бора, углерода, графита, базальта, диабазы по удельной прочности превосходят сталь в разы, тканые изделия из волокон выдерживают температуру до 2000 °С [19, 28, 85, 86]. Дисперсное армирование позволяет сочетать в одном агрегате и в рамках одного процесса такие технологические переделы, как приготовление смеси и армирование изделий [87, 88]. Одним из первых в России обстоятельные исследования дисперсно-армированных бетонов провел, вероятно, проф. Некрасов В.П. [89]. Он предложил зависимости влияния дисперсного армирования на предел прочности при сжатии и указал возможные области применения дисперсно-армированных бетонов. Обстоятельные исследования основных свойств и долговечности позволили разработать теоретические основы создания дисперсно-армированных композитов, предложить способы их расчета и технологические основы изготовления изделий и конструкций [19, 90-101].

Классификация дисперсной арматуры необходима для рационального применения волокон с различными свойствами в бетонах и растворах на гипсовых вяжущих в зависимости от решаемых задач. Все волокна делятся на металлические и неметаллические. Неметаллические волокна делятся на низко модульные (синтетические, некоторые химические и растительные) и высоко модульные (минеральные) [102-109]. Важным фактором является обеспеченность совместной работы матрицы и волокон при эксплуатации конструкций [83]. Эффективность дисперсного армирования определяется соотношением E_v/E_m (E_v – модуль деформаций волокон, E_m – модуль деформаций матрицы). При $E_v/E_m > 1$ имеет место существенный рост показателей прочности трещиностойкости. При $E_v/E_m < 1$ имеет место повышение только истираемости и ударной вязкости [110, 111].

Улучшение структурных характеристик матрицы повышает стойкость композита при воздействии агрессивных сред [91, 101]. Вторым важным фактором является химическая стойкость волокон по отношению к продуктам гидратации вяжущего, например, общеизвестно, что стеклянные волокна разрушаются при контакте с продуктами гидратации портландцемента, что приводит к снижению прочностных показателей дисперсно-армированных высокопрочными стеклянными волокнами портландцементных бетонов при эксплуатации [83]. Кроме того, по приведенным в [107] данным исследователей из Великобритании возможно образование пучков из армирующих стекловолокон, вследствие чего имеют место не армированные объемы матрицы, что вызывает неоднородность и снижение показателей композита [112].

Третьим важным фактором при выборе волокон является учет технологичности и доступности. Например, природный асбест широко доступен, но его применение осложняется вследствие высокой адгезии между волокнами, применение асбеста в качестве дисперсной арматуры требует значительных энергозатрат при подготовке и характеризуется многостадийностью [83], что снижает его привлекательность. Стеклянные, базальтовые, шлаковые, керамические и другие минеральные волокна обладают хрупкостью [107], что усложняет технологический процесс производства композитов и изделий из них. В качестве одной из мер по снижению влияния этого негативного фактора является уменьшение длины волокон, что способствует более равномерному распределению волокон в смеси и их сохранности, но приводит к уменьшению показателя l/d (длина/диаметр), что может стать причиной недостаточности длины анкеровки, т.е. к снижению эффективности дисперсного армирования.

Есть мнение, что при определенных условиях эффективно дисперсное армирование с одновременным применением высокомодульных и низко модульных волокон, так называемое комбинированное армирование [113-117], при реализации которого эффективно используются свойства высокомодульных воло-

кон и снижается себестоимость композита. Кроме того, считается целесообразным применение волокон различной длины, т.е. с различными значениями показателя l/d .

Наиболее широкое применение получили такие композиты как стеклофибробетон и сталефибробетон [90, 99, 100, 118]. Стеклофибробетон характеризуется, в т.ч., повышением предела при растяжении до 4 раз и ударной вязкости до 20 раз относительно традиционного бетона. Сочетание стальной арматуры с короткой фиброй или сеткой из стекловолокна в тонкостенных конструкциях обеспечивает восприятие растягивающих усилий и ограничение раскрытия трещин.

Минеральные волокна по данным [14, 19, 28, 105, 106, 108, 113] характеризуются следующими показателями:

- диаметр:
 - от 15 до 20 мкм (асбестовые, алюмоборосиликатные, базальтовые);
 - от 7 до 9 мкм (углеродные);
 - циркониевые 40 мкм;
 - борные 100 мкм;
- предел прочности при растяжении R_t и модуль упругости E , МПа:
 - $R_t = 5000 - 7000$, $E = 50000 - 70000$ (асбестовые);
 - $R_t = 1100 - 3800$, $E = 7000 - 8000$ (алюмоборосиликатные);
 - $R_t = 700 - 750$, $E = 70000 - 80000$ (циркониевые);
 - $R_t = 2000$, $E = 245000$ (углеродные);
 - $R_t = 25000$, $E = 70000$ (кварцевые);
 - $R_t = 1200$, $E = 67000$ (базальтовые);
 - $R_t = 2500 - 3800$, $E = 400000$ (борные).

Более полная информация о свойствах минеральных волокон по данным [14, 19, 28, 105, 106, 108, 113] представлена в приложении 1.

Растительные волокна по данным [14, 19, 28, 105, 106, 108, 113] характеризуются показателями предела прочности при растяжении R_t и модуля упругости E , МПа:

- $R_t = 400 - 1300$, $E = 20000 - 30000$ (льняные);

- $R_t = 900$, $E = 58000 - 74000$ (пеньковые, древесные).

Химические волокна по данным [14, 19, 28, 105, 106, 108, 113] характеризуются показателями предела прочности при растяжении R_t и модуля упругости E , МПа:

- $R_t = 80$, $E = 8400$ (вискозные);

- $R_t = 450$, $E = 7000$ (шелковые);

- $R_t = 20 - 100$, $E = 1000 - 10000$ (целлюлозные).

Синтетические волокна по данным [14, 19, 28, 105, 106, 108, 113] характеризуются показателями предела прочности при растяжении R_t и модуля упругости E , МПа:

- $R_t = 400 - 770$, $E = 3500 - 8000$ (полипропилен);

- $R_t = 500 - 780$, $E = 8400$ (лавсан);

- $R_t = 300$, $E = 1300 - 1500$ (хлорин);

- $R_t = 460 - 570$, $E = 2300$ (нейлон);

- $R_t = 410 - 930$, $E = 4400 - 14900$ (капрон).

Более полная информация о свойствах растительных, химических и синтетических волокон по данным [14, 19, 28, 105, 106, 108, 113] представлена в приложении 2.

1.4. Выбор вида волокон для армирования гипсобетонных композитов

С целью повышения уровня свойств материалов на основе гипсовых вяжущих, в первую очередь снижения хрупкости, т.е. при производстве дисперсно-армированных гипсобетонных композитов целесообразно применять волокна, соответствующие требованиям [14, 19]:

- $E_v/E_m > 1$, т.е. модуль упругости волокон должен превышать модуль упругости матрицы, а, поскольку модуль упругости матрицы на основе гипсовых вяжущих может иметь меньшие значения в сравнении с портландцементными материалами, номенклатура удовлетворяющих этому критерию волокон, возможных для применения, достаточно обширна;

- $\alpha_B \sim \alpha_M$, т.е. значения коэффициентов линейного температурного расширения матрицы и волокон должны быть близки;
- достаточный уровень сцепления между матрицей и волокнами;
- химическая (коррозионная) совместимость матрицы и волокон;
- технологичность волокон;
- доступность (не дефицитность) волокон;
- низкая стоимость волокон.

Одним из подходящих вариантов является использование базальтовых волокон, что обусловлено следующими причинами:

- во многих регионах имеются значительные запасы сырья для производства базальтовых волокон – базальт, диабаз, габбродорелит, порфирит [79];
- базальтовые волокна и при производстве и при применении соответствуют нормам экологической безопасности;
- модуль упругости базальтового волокна составляет от 93 до 113 ГПа и до 25 % превышает модуль упругости стеклянного волокна, а по прочности при растяжении от 1850 до 2150 МПа они практически не уступают высокопрочным стеклянным волокнам;
- себестоимость производства базальтовых волокон ниже в сравнении со стеклянными вследствие применения одностадийной менее энергозатратной технологии, при этом диаметр элементарной нити базальтовых волокон составляет от 8 до 13 мкм;
- показатель рН гипсового камня составляет от 6,5 до 8, такая среда с коррозионной точки зрения безопасна практически для всех минеральных волокон;
- базальтовые волокна, характеризующиеся высокой термостойкостью, возможны для применения при производстве теплоогнезащитных композитов на основе гипсовых вяжущих и изделий из них;
- базальтовые волокна являются более щелочестойкими в сравнении со стеклянными [19], что позволяет применять их при производстве композитов на смешанных (комбинированных, многокомпонентных, комплексных) вяжущих, структура которых характеризуется более высоким показателем рН;

- имеется большой практический опыт производства и применения базальтовых волокон с начала 1960-х годов.

Промышленно производятся грубые базальтовые волокна длиной 75 ± 25 мм марок [28, 119]:

- БГВ-150 с прочностью на разрыв 200 МПа и диаметром от 80 до 150 мкм;
- БГВ-250 с прочностью на разрыв 150 МПа и диаметром от 151 до 250 мкм;

- БГВ-400 с прочностью на разрыв 80 МПа и диаметром от 251 до 400 мкм.
Длина грубых волокон всех марок составляет 75 ± 25 мм.

Сравнительные испытания дисперсно-армированных гипсобетонов алюмоборосиликатными волокнами длиной от 10 до 15 мм и базальтовыми волокнами аналогичной длины при дозировке 0,5 % от массы гипса выявили преимущества базальтовых волокон в виде повышения пределов прочности при изгибе до 11 %, при сжатии до 23 % и уменьшения водопоглощения композита до 18 % [120-122].

Как известно, матрица на основе гипсовых вяжущих имеет принципиальное отличие в развитии собственных деформаций при твердении от матрицы портландцементной. При формировании структуры матрицы на основе гипсовых вяжущих имеет место расширение до 3 мм/м, при высыхании не существенной усадки. В результате прочность сцепления матрица на основе гипсовых вяжущих – волокно имеет скромные показатели [123]:

- прочность сцепления со сталью составляет от 4 до 12 % от прочности сцепления стали с портландцементным камнем;

- прочность сцепления со стекловолокном составляет от 11 до 83 % от прочности сцепления стали с портландцементным камнем в зависимости от водо/гипсового отношения.

Этот факт можно отнести к недостаткам композитов на гипсовых вяжущих. Очевидна перспективность исследований вопроса повышения прочности сцепления волокон с матрицей, возможно, полученной из комбинированных вяжущих.

Одним из ключевых моментов при производстве дисперсно-армированных композитов является процесс получения смеси, конкретно – перемешивание компонентов с целью получения однородной массы., поскольку равномерность распределения волокон, которая зависит, в частности, от их распушки, в значительной степени влияет на свойства композитов, в т.ч. на основе гипсовых и комбинированных вяжущих. Учитывая тот факт, что при производстве дисперсно-армированных композитов на основе гипсовых вяжущих могут применяться в качестве компонентов смеси пористые материалы, например, отходы пиления вулканического туфа, которые повышают водопотребность смеси, становится очевидной актуальность уделения особого внимания процессам перемешивания смесей.

По данным [103, 124] наиболее эффективны для приготовления дисперсно-армированных смесей смесители с вертикальным быстровращающимся валом, в т.ч. турбулентные, особенно эффективные для производства литых смесей на основе гипсовых вяжущих [125].

1.5. Анализ сырьевой базы заполнителей и перспектив использования техногенных отходов

Использование техногенных отходов взамен природного сырья для производства строительных материалов и изделий позволяет снизить себестоимость продукции и уменьшить загрязнение окружающей среды [19. 126-130], снизить расход топлива до 40 %, себестоимость строительной продукции до 3 раз при сокращении удельных капиталовложений до 50 % [66, 131]. Добыча в карьерах штучного камня дает выход от 50 до 70 %, остальное представляют отходы, представляющие сырье для производства дешевых пористых природных заполнителей [19, 132-134]. Пористые заполнители при формировании структуры композита обеспечивают эффект «самовакуумирования» [135], что уплотняет контактную зону «матрица-заполнитель» и играет важную роль в обеспечении стойкости бетонов на пористых заполнителях к атмосфер-

ным воздействиям. Одним из основных критериев для оценки технологических и конструктивных свойств пористых заполнителей является показатель отношения прочности к плотности в куске и насыпной плотности [136].

Отходы камнепиления характеризуются разнообразием структуры, свойств, химического и минералогического состава [132-144]. Микро- и макроструктура заполнителей отличается от исходной породы, что повышает их прочность и однородность относительно исходной породы [137]. Пористые заполнители из отходов камнепиления характеризуются зерновым составом от практически 0 до 40 мм.

При производстве изделий из смесей на основе гипсовых вяжущих в случае необходимости использования заполнителей исторически широко применялись органические материалы, такие как древесная стружка, опилки, древесная шерсть, костра, торф, солома, камыш и др., которые, наряду с положительным эффектом (улучшение теплотехнических свойств, гвоздимости, прочности при ударе, изломе), обладают, относительно минеральных заполнителей такими недостатками как снижение прочности при сжатии вследствие, в т.ч. повышении до 20 % водопотребности смеси. Последнее удлиняет процесс сушки изделий и, закономерно, повышает энергозатраты производства. Кроме того, органические заполнители как правило неустойчивы к грибковым поражениям [49, 125, 137, 138].

Различные пески, золы, шлаки и другие неорганические при положительном влиянии на прочностные свойства композитов могут существенно повышать среднюю плотность, хрупкость и ухудшать теплофизические свойства изделий. Предпочтение следует отдавать заполнителям с шероховатой поверхностью и легким, например, котельные шлаки, пемза, туфы, керамзитовые щебень и гравий.

Средняя плотность шлаков составляет от 650 до 1100 кг/м³. Гипсобетоны на котельных шлаках характеризуются пределом прочности при сжатии до 10 МПа при средней плотности до 1600 кг/м³.

На территории РФ известны большие запасы таких горных пород как туфы, известняки-ракушечники, рыхлых пород вулканического происхождения,

таких как пеплы, пемзы, шлаки [140]. Месторождения вулканических пород имеют место на Северном Кавказе, Дальнем Востоке, Камчатке, Сахалине, Бурятии и др. [132, 141, 142].

Средняя плотность пемзы составляет от 300 до 800 кг/м³, а коэффициент теплопроводности от 0,12 до 0,2 Вт/м·К [19, 28]. Применение пемзы позволяет получать высококачественные композиты на основе гипсовых вяжущих с высокими теплоизоляционными свойствами. В Кабардино-Балкарии месторождения пемзы находятся вблизи г. Герпегеж. Каменское месторождение располагает запасами пеплопемзовой смеси. Месторождения Гижгитское, Былымское и Псыхурейское располагают запасами пемзовых песков [83]. Насыпная плотность пемзовых смесей месторождений Псыхурейское, Гижгитское, Былымское составляет от 600 до 650 кг/м³ [28].

При использовании вулканических туфов гипсобетонные композиты имеют более высокую среднюю плотность в сравнении с пемзой. Кабардино-Балкария располагает большими запасами туфов, пеплов, пемзы, позволяющими обеспечить потребности в заполнителях Северо-Кавказского и Южного Федерального округов [132]. Средняя плотность туфов составляет:

- светло-серые туфы в центральном районе республики у вершины г. Хора-Хора (Заюковское месторождение) до 1920 кг/м³;
- серые туфы выше селения Лечинкай - до 1980 кг/м³;
- темно-серые туфы по реке Аргаюк - до 2190 кг/м³;
- темно-красные туфы ниже селения Нижний Чегем - до 2250 кг/м³.

Прочность туфов изменяется от 3,5 до 60 МПа. Водопоглощение по массе туфов изменяется от 8 до 33,8 %, различия обусловлены условиями спекания туфов [19, 28, 143]. По химическому составу вулканические туфы принадлежат к кислым породам. Химический состав туфов достаточно разнообразен и характеризуется, по данным [19, 28, 143], содержанием основных оксидов, %:

- SiO₂ от 64,35 до 74,44;
- Al₂O₃ от 7,69 до 13,75;
- Fe₂O₃ от 1,27 до 1,75;

- CaO от 1,16 до 1,65.

Более подробные данные о химическом составе туфов по данным [19, 28, 143] приведены в приложении 3.

Месторождения рыхлых пористых материалов вулканического происхождения в Кабардино-Балкарии представлены:

- Кенженским месторождением вулканического пепла и пеплопемзы с насыпной плотностью от 886 до 1080 кг/м³ и пористостью до 30 % - 70 %;

- пумицитом – природным пемзовым песком и пеплом с размерами частиц от сотых долей до 5 мм при истинной плотности породы от 2,41 до 2,53 г/см³ и насыпной плотности от 1140 до 1870 кг/м³ [19, 28]

По данным [19, 140] до 35% кремнезема, входящего в состав рыхлых пористых материалов вулканического происхождения находится в аморфном (активном) состоянии, химический состав их достаточно разнообразен и характеризуется содержанием основных оксидов, %:

- SiO₂ от 62,72 до 72,96;

- Al₂O₃ от 11,97 до 13,15;

- Fe₂O₃ от 1,42 до 1,8;

- CaO от 2,38 до 8,0.

Более подробные данные о химическом составе туфов по данным [19, 28, 143] приведены в приложении 4.

Тонкодисперсность ряда вулканических горных пород позволяет исключить энергоемкий процесс помола при производстве, например, пенобетонов [83]. Применение их в качестве заполнителей весьма перспективно в регионах, обладающих соответствующей сырьевой базой [142, 144]. Применение рыхлых вулканических пород (пепел, пеплопемза) весьма перспективно для производства композитов на основе гипсовых вяжущих, поскольку рыхлые породы одновременно выполняют роль и мелкого заполнителя и активной минеральной добавки. Они не требуют помола и обладают весьма стабильными в сравнении, например, с металлургическими шлаками или золами и шлаками ТЭЦ. Вулканический пепел в достаточном количестве имеется в Кабардино-Балкарии.

При производстве легких жаростойких бетонов к заполнителям предъявляются дополнительные требования по термической стойкости, коэффициенту линейного температурного расширения и огнеупорности [145]. Этим требованиям соответствуют такие широко применяемые заполнители как вспученный вермикулит и керамзит, обладающий относительно высокой прочностью при относительно невысоких средней плотности и водопоглощении. По данным НИИ керамзита огнеупорность рядового керамзита находится в интервале от 1200 до 1250 и даже 1300 °С в зависимости от химико-минералогического состава исходных глин. Жаропрочность, характеризуемая деформацией при напряжении 0,1 МПа, составляет от 730 до 900 °С. Термостойкость (800 °С) составляет от 9 до 30 теплосмен [28].

Вспученный вермикулит характеризуется весьма низкой насыпной плотностью от 70 до 200 кг/м³ при высокой термической стойкости [146]. Огнеупорность вспученного вермикулита составляет от 1270 до 1430 °С. При насыпной плотности 100–200 кг/м³ фракций 0–10 мм коэффициент теплопроводности составляет от 0,03 до 0,05 Вт/(м·°С). В России известно более 25 месторождений вермикулита. Для огнезащиты строительных конструкций применяются материалы на основе вермикулита в виде облицовки из плитных, листовых, штучных изделий, а также штукатурок. На основе вермикулита в сочетании с асбестом разработаны теплоизоляционные материалы на основе портландцементных, магнезиальных, глиноземистых цементах, в т.ч. вермикулитобетон со средней плотностью до 500 кг/м³, пределом прочности на сжатие бетона до 0,5 МПа и коэффициентом теплопроводности в пределах 0,09–0,11 Вт/(м·°С) [14, 147-150].

Огнеупорность вспученного перлита составляет от 1190 до 1250 °С. Температура вспучивания составляет от 960 до 1250 °С. Коэффициент вспучивания от 3 до 15. Вспученный перлит обладает замкнутыми воздушными порами [151, 152]. Применяются огнезащитные штукатурки на основе вспученного вермикулита и перлита с минеральной ватой либо асбестом [153].

Огнеупорность аглопорита изменяется в широком диапазоне, от 1300 до 1730 °С и снижается при повышении содержания Fe_2O_3 от 0,8 % до 9,6 % [154]. Термостойкость (воздушные теплосмены 800 °С) не менее 25 циклов.

Жаростойкие бетоны на керамзите, вермикулите, аглопорите характеризуются средней плотностью от 750 до 1500 кг/м³ и пределом прочности при сжатии от 3 до 20 МПа. [28, 155].

Термозит (шлаковая пемза) в виде щебня и песка обладает коэффициентом линейного температурного расширения и малой термической стойкостью, разрушение имеет место после 15 воздушных теплосмен при температурах от 700 до 800°С.

Одной из тенденций является применение для жаростойких бетонов пористых заполнителей из отходов промышленности, в т.ч. глубокой переработкой некондиционного природного сырья [154]. Заполнители из слабовспучивающихся вулканических пеплов, полученные методом агломерации, характеризуются насыпной плотностью от 450 до 650 кг/м³, прочностью в цилиндре от 1,2 до 2,2 МПа, огнеупорностью до 1350°С, высокой (более 45 водных теплосмен) термостойкостью, коэффициентом линейного температурного расширения в диапазоне $(2,5-5,4) \cdot 10^{-6} \cdot \text{°C}^{-1}$ [28, 156].

Среди промышленных отходов одно из первых мест по объемам занимают золы и шлаки от сжигания твердых видов топлива (уголь разных видов, горючие сланцы, торф) на тепловых электрических станциях. Огромные количества золы и шлака скопились в отвалах, занимающих ценные земельные угодья. Содержание золошлаковых отходов требует значительных затрат. В то же время золы и шлаки тепловых электрических станций можно эффективно использовать в производстве различных строительных материалов, что подтверждается многочисленными научными исследованиями и практическим опытом.

Техногенные отходы в виде зол, золошлаковых смесей и шлаков ТЭС, доменных гранулированных шлаков, отходов угледобычи и углеобогащения, горнорудной промышленности и промышленности строительных материалов перспективны в качестве сырья для промышленности строительных материалов, при производстве которых доля

сырья составляет до 50% себестоимости продукции и, кроме того, способствует улучшению экологической [157-161]. В качестве тонкомолотых минеральных добавок при производстве различных растворов и бетонов применяются каменная мука, глина, диатомит, вулканические туфы и пеплы, трепел, молотый бой керамического кирпича, зола-уноса ТЭЦ, доменные и ферросплавные гранулированные шлаки [161].

Выводы по главе 1

1. В связи с ростом этажности возводимых зданий, особенно в условиях плотной городской застройки, несущие конструкции которых выполнены в основном из железобетона, возрастает актуальность разработки новых и совершенствования известных конструктивных решений и материалов, обеспечивающих снижение пожарной опасности зданий, в первую очередь, посредством огнезащиты с использованием конструкций с пониженной пожарной опасностью и эффективных огнезащитных составов, в т.ч. для огнезащитных штукатурных покрытий традиционного или машинного нанесения, к достоинствам которых относятся низкая стоимость и трудоемкость, технологичность, декоративность и атмосферостойкость. Актуальной задачей является разработка эффективных огнезащитных составов с максимальным использованием местного сырья и техногенных отходов.

2. Для производства эффективных огнезащитных составов широко применяются гипсовые вяжущие, в т.ч. многокомпонентные, в первую очередь в сочетании с портландцементом и различными активными минеральными добавками (ГЦПВ, ГШЦВ, ГИШВ), композиционные гипсовые вяжущие низкой водопотребности, в т.ч. с гидрофобизирующими добавками различного химического состава для повышения водостойкости и технологичности. Актуальной является задача выявления влияния состава композиционного гипсового вяжущего с учетом особенностей свойств его компонентов на основные показатели, определяющие целесообразность его применения.

3. Применение дисперсного армирования обеспечивает в одном технологическом процессе объединение приготовления смеси и армирования изделий, существенно повышает трещиностойкость изделий и стойкость композитов в агрессивных средах. Эффективность дисперсного армирования обеспечивается при условии высокомодульности волокон по отношению к матрице, сочетании высокомодульных и низкоимодульных волокон, близости значений коэффициентов линейного температурного расширения матрицы и волокон, обеспеченности уровня сцепления между матрицей и волокнами, химической (коррозионной) совместимости матрицы и волокон, технологичности, доступности и низкой стоимости волокон. Актуальной является задача определения параметров рационального дисперсного и полидисперсного армирования в зависимости от свойств волокон и матрицы.

4. Для рационального использования туфов, пеплов, пемзы Кабардино-Балкарии для производства огнезащитных составов целесообразно выявить влияние вида и дозировки указанных материалов, используемых в качестве заполнителей, наполнителей и активных минеральных добавок при производстве огнезащитных дисперсно-армированных композитов на основе гипсовых и композиционных вяжущих. Актуальной является задача получения закономерностей изменения показателей качества огнезащитных композитов от рецептурных (состав вяжущего, вид и дозировка заполнителей, наполнителей, волокон) и технологических (способы приготовления смесей) факторов.

5. На основании обзора и анализа известных решений по рассматриваемой проблеме в работе формулируется **рабочая гипотеза** о том, что рациональные огнезащитные составы могут быть разработаны на основе выявленных закономерностей влияния рецептурных и технологических факторов при производстве дисперсно-армированных композитов на основе местного сырья, комбинированного вяжущего и химических добавок на основные строительные-технические свойства композитов.

Глава 2. ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Характеристика используемых материалов

Характеристики материалов, использованных в исследованиях, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристика материалов, используемых
в исследовании

№ п/п	Наименование материала	Производитель, месторождение	Характеристика
Вяжущее			
1	гипс строительный	АО Усть-Джегутинский гипсовый комбинат	марка Г-5 БШ по ГОСТ 125-79 с характеристиками по ГОСТ 23789-79: тонкость помола – 12,5 %; нормальная густота – 50 %; сроки схватывания: начало – 12 мин, конец – 17 мин; предел прочности при сжатии и изгибе соответственно – 5,3 МПа и 2,6 МПа
2	портландцемент ПЦ500-ДО	АО «Белгородский цемент»	ЦЕМ I 42,5 Н по ГОСТ 31108-2020 с характеристиками: предел прочности при сжатии в 28 сут 49,4 МПа, в 2 сут 23,9 МПа; начало схватывания – 174 мин; конец схватывания – 256 мин
Заполнитель, наполнитель, минеральная добавка			
3	кварцевый песок	Малкинское месторождение, Кабардино-Балкарская республика	фракция 0–5 мм, модуль крупности – 2,2
4	пемзовый песок	Псыхурейское месторождение, Кабардино-Балкарская республика	фракция 0–2,5 мм, насыпная плотность – 700 кг/м ³

№ п/п	Наименование материала	Производитель, месторождение	Характеристика
5	вулканический пепел	Заюковское месторождение, Кабардино-Балкарская республика	фракции 0–5 мм, насыпная плотность – 1100 кг/м ³
6	вспученный вермикулит	АО "Слюдяная фабрика", г. Санкт-Петербург, Колпино	фракции 0,16–5 мм, насыпная плотность – 150 кг/м ³
Добавка			
7	смола древесная омыленная (СДО)	ООО «Альянс-Строительные Технологии», Московская обл., г. Дзержинский	ТУ 2453-001-00279870-04
8	полифункциональная добавка Д-5	ООО НПП «ТОКАР», г. Владикавказ	
Дисперсная арматура			
9	базальтовые волокна (РНБ-9-1200-4с)	АО «Ивотстекло», Брянская обл., п. Ивот	диаметр элементарного волокна – d=9 мкм; модуль упругости – E=(91–110)·10 ³ МПа; разрывная нагрузка – P=400Н
10	полипропиленовая фиброй RS	ООО «Руссеал»	длина –12 мм; температура плавления – 160-170 °С
11	Низкоуглеродистая тканая сетка № 8–07	ООО "ЛИОНМеталс, г. Челябинск	ГОСТ 3826–82, размер ячейки – 8×8 мм, диаметром проволоки – 0,7 мм

Химический и минералогический составы портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н АО «Белгородский цемент» приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Химический и минералогический состав портландцемента
ЦЕМ I 42,5 Н АО «Белгородский цемент»

Химический состав, %	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	щелочи	п.п.п.
	20,70	4,98	5,85	64,96	1,88	0,24	0,69	0,7
Минералогический состав, %	C ₃ S		C ₂ S		C ₃ A		C ₄ AF	
	64		11		3		18	

Химический состав вулканической пемзы приведен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Химический состав вулканической пемзы

Содержание основных компонентов в % от массы							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	SO ₃	п.п.п.
72,80	13,15	1,80	2,38	0,50	6,30	0,02	3,05

Химический состав вулканической пепла приведен в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Химический состав вулканического пепла

Содержание основных компонентов в % от массы								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+K ₂ O	TiO	SO ₃	п.п.п.
73,1	13,75	1,75	1,65	1,12	3,87	0,23	0,12	2

В таблице 2.5 представлены данные о гранулометрическом составе вулканического пепла, пемзы и вспученного вермикулита.

Таблица 2.5 – Гранулометрический состав вулканического пепла, пемзы и вспученного вермикулита

Наименование материала	Частные остатки на ситах, %					Прошло сквозь сито № 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
Пепел	9,3	9,2	19	18,7	15,4	28,4
Пемза	–	1	11	53,5	35	9,5
Вспученный вермикулит	28	12	13	28,5	18,5	–

На рисунке 2.1 представлены полипропиленовая и базальтовая фибры



Рисунок 2.1 – Полипропиленовая и базальтовая фибры

На рисунке 2.2 представлены вулканический пепел, вспученный вермикулит и вулканическая пемза.



Рисунок 2.2 – Вулканический пепел, вспученный вермикулит и вулканическая пемза

2.2. Методика исследования

Изготовление образцов из теплоогнезащитных фиброгипсоцементновермикулитобетонных и растворных композитов с применением вулканического пепла и пемзы включает следующие операции:

- подготовка вулканического пепла, пемзы и вспученного вермикулита;
- приготовление смеси;
- формование образцов;
- сушка образцов в воздушно-сухих условиях.

Приготовление смеси осуществляли в смесителе принудительного действия.

Образцы-балочки размером 4x4x16 см формовали литьевым способом, вибрационным способом либо вибрационным под пригрузом в зависимости от консистенции смеси в соответствии с планом эксперимента.

Испытание образцов выполнялось в соответствии с ГОСТ 23789-2018.

Более детально технология изготовления образцов в зависимости от состава, способа приготовления смеси и формования изделий приводится в диссертационной работе в ходе её изложения.

Оценка огнезащитной эффективности разработанных композитов производилась испытанием двухслойных плит. Несущий слой из мелкозернистого бетона 20 мм формовалось вибрационным способом. Формование огнезащитного слоя из смесей исследованных композитов выполнялось литьевым способом. После формования и предварительного выдерживания осуществлялась сушка в воздушно-сухих условиях.

Огнезащитные свойства разработанных композитов оценивались посредством испытания на электрической печи образцов размерами 210×210 мм в горизонтальном положении по стандартному температурному режиму пожара по ГОСТ 30247.1-94. Определялся предел огнестойкости двухслойных элементов по теплоизолирующей способности (I) по показателю повышения температуры на необогреваемой поверхности более чем на 140 °С относительно температуры до начала испытаний. Предел огнестойкости по несущей способности (R) армоцементных плит по показателю прогрева тканой сетки до 300 °С на границе конструктивного и огнезащитного слоев определяли расчетным методом по результатам эксперимента.

Температура образцов на необогреваемой поверхности фиксировалась цифровым термометром ТМ-902С с термопарой К типа ТР-01. Также для замера температуры на необогреваемой поверхности применялись термоиндикаторы плавления ТИП-160 высокочувствительные по ТУ 2638-002-48591565-2000.

Схема испытания двухслойного образца и расстановки термопар изображена на рисунке 2.3.

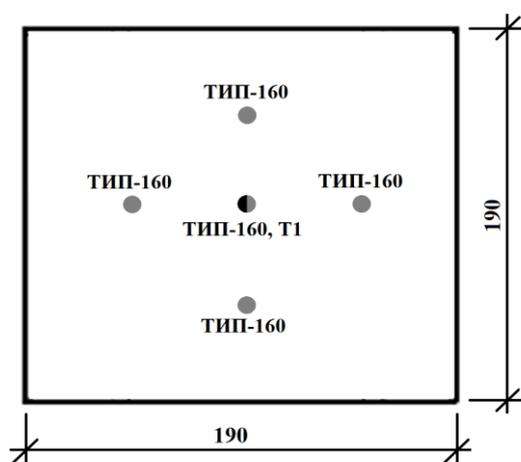


Рисунок 2.3 – Схема испытания двухслойного образца и расстановки термопар на необогреваемой поверхности

Для определения огнезащитных свойств разработанных композитов нами была изготовлена электрическая печь, позволяющая создавать температурный режим стандартного пожара (рисунок 2.4). Отклонение температуры в изготовленной лабораторной электрической печи от стандартного температурного режима пожара во время испытаний образцов составляло всего 3 %.



Рисунок 2.4 – Вид лабораторной электрической печи для определения огнезащитных свойств разработанных композитов

На рисунке 2.5 представлена схема лабораторной электрической печи для определения огнезащитных свойств разработанных композитов.

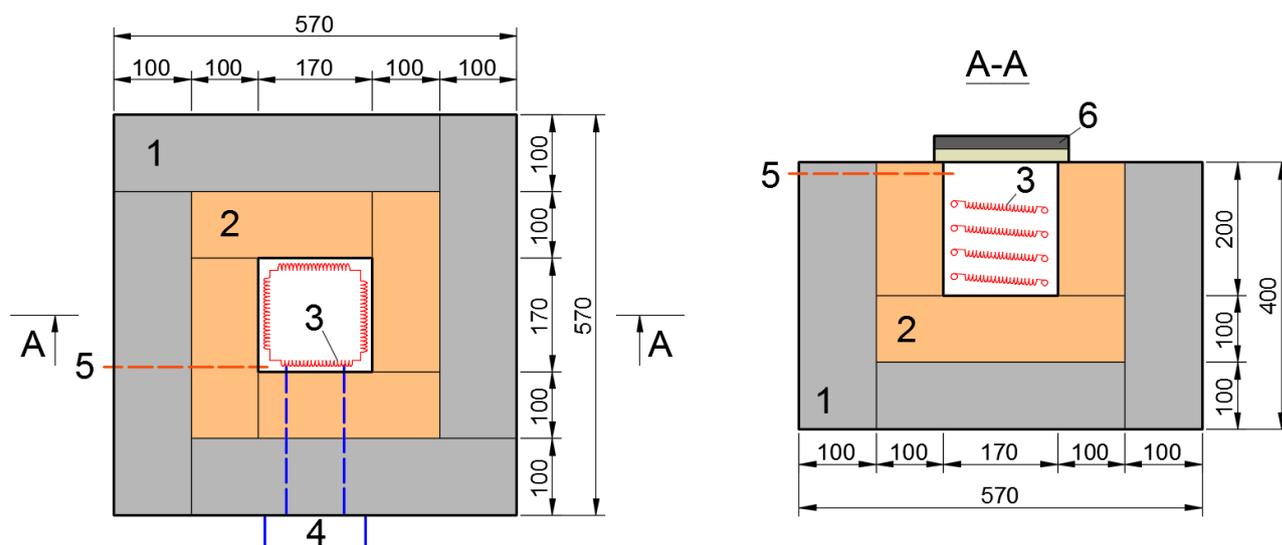


Рисунок 2.5 – Схема лабораторной электрической печи для определения огнезащитных свойств разработанных композитов

- 1 – газобетон плотностью D350; 2 – шамотно-волокнистая плита ШВП-350;
 3 – нагревательная проволока из фехрала; 4 – блок управления нагревателем;
 5 – термопара WRP-100 К типа до 1300 °С; 6 – образец для испытания

Для определения показателей качества использованных материалов и испытываемых образцов применялись стандартные методики:

- средняя плотность по ГОСТ 12730.1-2020;
- предел прочности при изгибе и сжатии по методике проведения испытаний образцов по ГОСТ 310.4-81;
- коэффициент теплопроводности по ГОСТ 30256-94;
- свойства исследованных смесей по ГОСТ 28013-98 Растворы строительные. Общие технические условия и ГОСТ Р 58767-2019 Растворы строительные. Методы испытаний по контрольным образцам.

Для определения физико-механических свойств разработанных композитов после нагревания образцов – балочек по температурному режиму стандартного пожара использовали электрическую муфельную печь SNOL 6,7/1300.

При планировании экспериментов и обработке результатов использовались методы математического планирования экспериментов и статистической обработки результатов [162-165].

Глава 3. ФИБРОГИПСОЦЕМЕНТНОБЕТОННЫЕ КОМПОЗИТЫ С ВУЛКАНИЧЕСКИМ ПЕПЛОМ

3.1. Влияние рецептурных факторов на свойства гипсопеплоцементнобетонного композита

Поскольку тонкодисперсные фракции вулканического пепла по сути являются пуццоланами, т.е. обладают гидравлической активностью, которая дополнительно может побуждаться при наличии в составе смеси строительного (полуводного) гипса [83], на первом этапе исследований произведена оценка влияния на предел прочности при изгибе и сжатии комбинированного вяжущего «гипс + портландцемент» дозировки портландцемента. Смеси для изготовления образцов методом литья использовались стандартной консистенции (нормальной густоты) с диаметром расплыва теста 180 ± 5 мм, вытекающего из цилиндра при его поднятии (ГОСТ 23789—2018).

На рисунке 3.1 представлена зависимость предела прочности комбинированного вяжущего при изгибе от дозировки ПЦ. На рисунке 3.2 представлена зависимость предела прочности комбинированного вяжущего при сжатии от дозировка ПЦ.

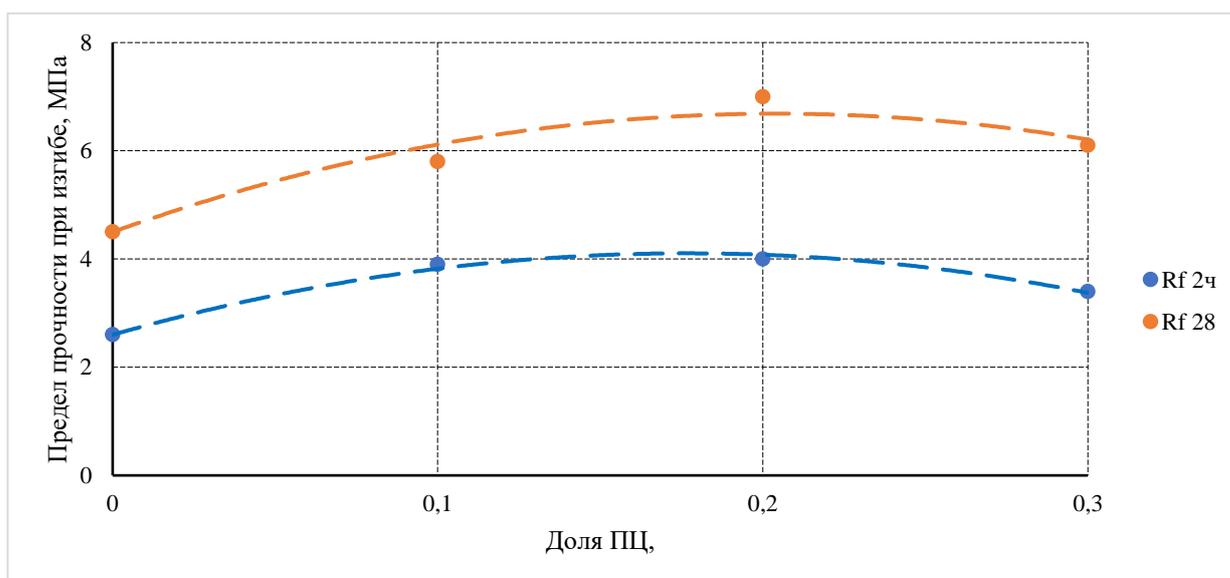


Рисунок 3.1 – Влияние доли ПЦ в составе комбинированного вяжущего на предел прочности при изгибе

Rf 2ч, Rf 28 – соответственно после 2 ч и 28 сут твердения

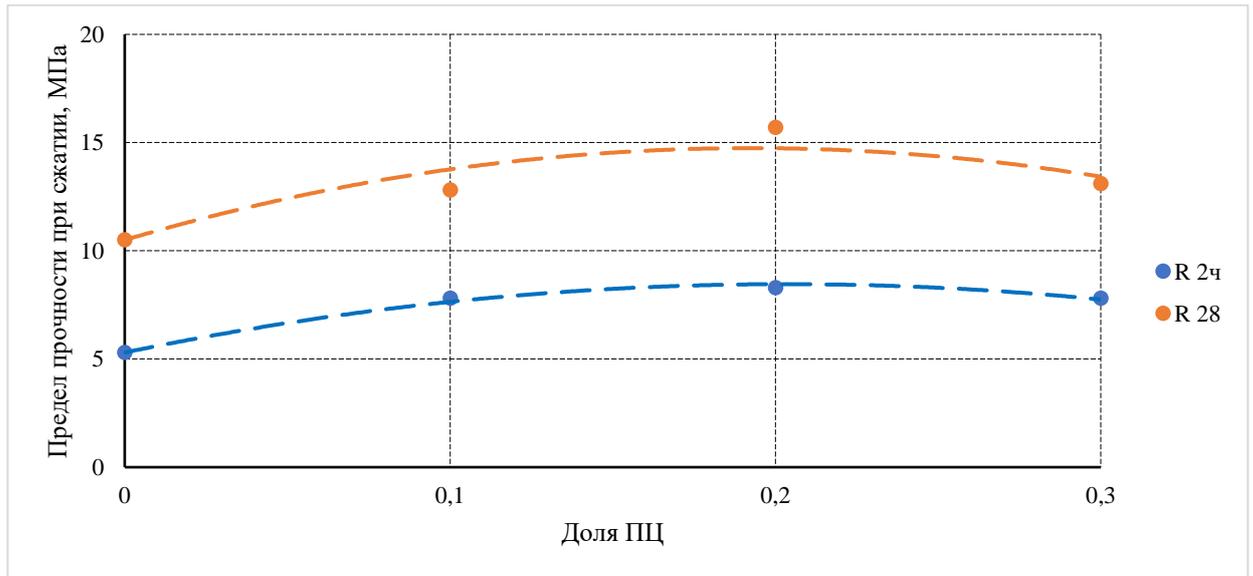


Рисунок 3.2 – Влияние доли ПЩ в составе комбинированного вяжущего на предел прочности при сжатии
R 2ч, R 28 – соответственно после 2 ч и 28 сут твердения

Представленные на рисунках 3.1, 3.2 зависимости пределов прочности при изгибе и сжатии от дозировки ПЩ в составе гипсоцементного вяжущего описываются формулой:

$$R_f, R = a + bЦ + cЦ^2, \quad (3.1)$$

где R_f, R – соответственно пределы прочности при изгибе и сжатии, МПа;
Ц – дозировка портландцемента в составе комбинированного вяжущего, %;
 a, b, c – коэффициенты, численные значения которых представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры уравнения ф. (3.1)

Предел прочности	Параметры уравнения ф. (3.1)							
	Через 2 ч				Через 28 сут			
	a	b	c	R^2*	a	b	c	R^2*
при изгибе	2,6	17,0	-48,7	0,99	4,5	21,4	52,4	0,94
при сжатии	5,3	31,1	-76,3	0,99	10,5	44,1	114,5	0,86

Примечание: * – показатель достоверности аппроксимации

Анализ полученных результатов (рисунков 3.1, 3.2) показывает:

- увеличение предела прочности при изгибе при введении в состав гипсового вяжущего ПЦ в зависимости его от дозировки и сроков твердения раствора составляет от 1,29 до 1,55 раза, при этом максимальное повышение обеспечивается при доле ПЦ в составе комбинированного вяжущего порядка 0,2;

- увеличение предела прочности при сжатии при введении в состав смеси ПЦ в зависимости от его дозировки и сроков твердения составляет от 1,22 до 1,57 раза, при этом максимальное повышение также обеспечивается при доле ПЦ в составе комбинированного вяжущего порядка 0,2;

На рисунке 3.3 приведена зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии исследованных комбинированных вяжущих в сравнении с данными по строительному гипсу и ПЦ. Поскольку предел прочности ПЦ значительно превосходит данные рисунков 3.1, 3.2, для сравнительной оценки по данным ГОСТ Р 55224 была получена зависимость $R_f = f(R)$, которая и представлена на рисунке 3.3.

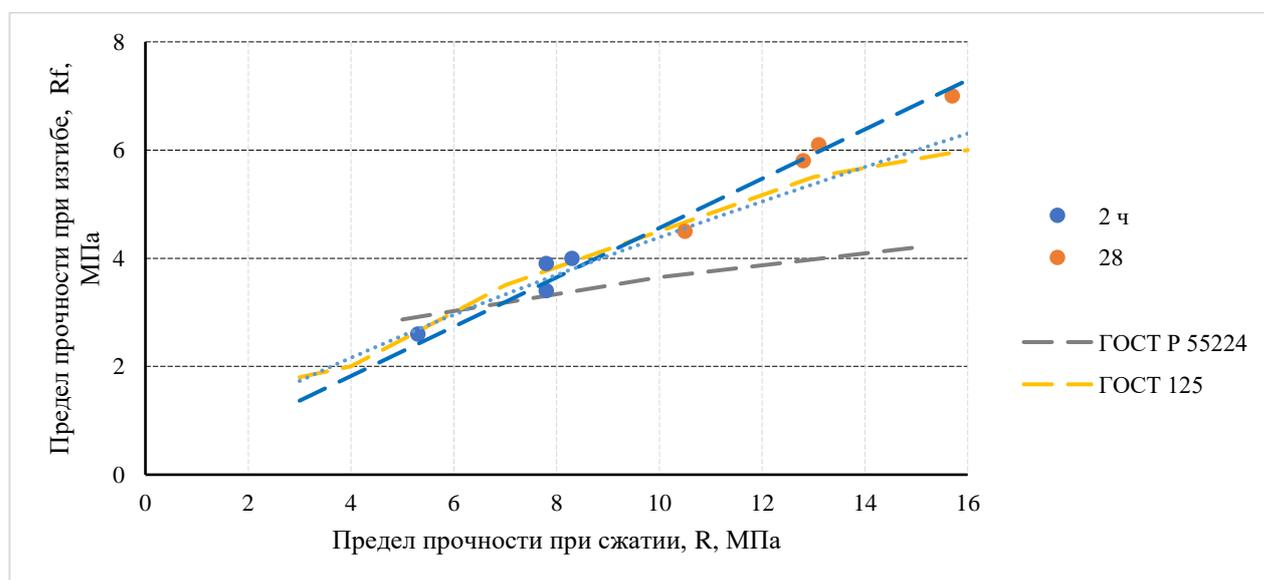


Рисунок 3.3 – Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии исследованных комбинированных вяжущих
2 ч, 28 – соответственно через 2 ч и 28 сут твердения

Предел прочности при изгибе практически линейно зависит от предела прочности при сжатии исследованных комбинированных вяжущих и описывается уравнением:

$$R_f = 0,456R \quad (3.2)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$.

Анализ полученных результатов показывает, что:

- соотношение R_f/R для гипсоцементного вяжущего в возрасте 2 ч практически совпадает с характерными для строительного гипса по ГОСТ 125-2018 показателями, что вполне закономерно, поскольку за это время ПЦ практически не включается в работу;

- в возрасте 28 сут отмечается некоторое опережение соотношения R_f/R гипсоцементного вяжущего относительно ГОСТ 125-2018, причем с ростом предела прочности при сжатии различие возрастает;

- соотношение R_f/R для гипсоцементного вяжущего в возрасте 28 сут значительно, до 1,67 раза превосходит соотношение для ПЦ в основном вследствие пониженной относительно портландцементных растворов прочности исследованных вяжущих при сжатии.

На втором этапе произведена оценка свойств смесей и затвердевших композитов, полученных при замене части строительного гипса на вулканический пепел. В таблице 3.2. приведены результаты измерений средней плотности, пределов прочности при изгибе и сжатии исследованных гипсопеплоцементных композитов. Использован вулканический пепел с максимальной крупностью зерен 5 мм. Следует отметить, что, поскольку пепел выполняет фактически двойную функцию, а именно пуццоланы (тонкодисперсные фракции) и заполнителя (фракции до 5 мм), появляется возможность улучшить прочностные свойства композитов, технологические свойства смесей, сократить расход вяжущего, в связи с чем становится актуальным подбор зернового состава заполнителя.

Таблица 3.2 – Строительно-технические свойства исследованных

ГИПСОПЕЛОЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

№ состава	Соотношение* (Г+ПЦ) : П	Доля ПЦ в вяжущем	ρ^1 , кг/м ³	Прочность, в возрасте			
				R_f^2		R^3	
				2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	2	3	4	5	6	7	8
1	1:1	–	1183	2,1	3,8	4,6	7,0
2	1:1	10	1174	2,2	3,9	5,2	7,7
3	1:1	20	1195	2,3	4,0	5,4	7,6
4	1:1	30	1182	1,8	3,8	4,2	7,2
5	1:2	–	1090	1,3	2,4	2,4	5,6
6	1:2	10	1076	1,6	2,7	3,3	5,9
7	1:2	20	1122	1,4	2,7	2,8	5,8
8	1:2	30	1168	0,9	2,7	1,4	4,9

Примечание: * – по массе; 1 – средняя плотность в возрасте 28 сут; 2 – предел прочности при изгибе (МПа); 3 – предел прочности при сжатии (МПа)

По данным таблицы 3.2. результаты оценки зависимости предела прочности при изгибе исследованных композитов от доли ПЦ в составе комбинированного вяжущего приведены на рисунке 3.4, а на рисунке 3.5 приведены аналогичные результаты для зависимости предела прочности при сжатии.

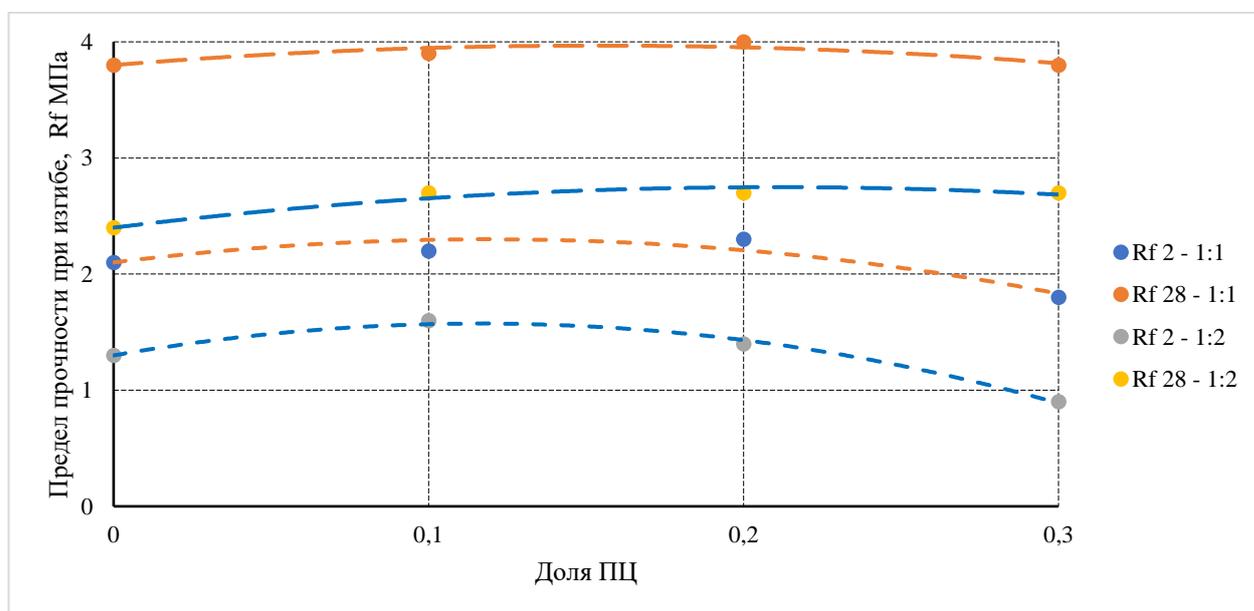


Рисунок 3.4 – Влияние доли ПЦ в составе комбинированного вяжущего на предел прочности при изгибе композитов по данным таблицы 3.2
Rf 2, Rf 28 – соответственно после 2 ч и 28 сут твердения, 1:1: 1:2 – соотношение гипс:пепел

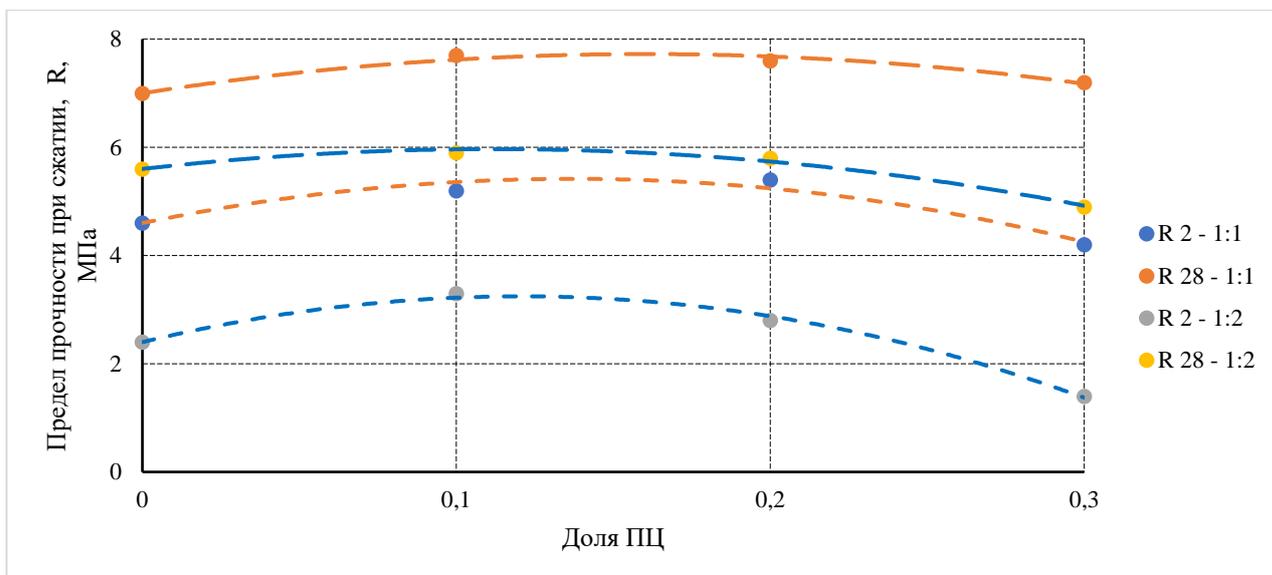


Рисунок 3.5 – Зависимость предела прочности при сжатии от дозировка портландцемента в составе вяжущего по данным таблицы 3.2
R 2, R 28 – соответственно после 2 ч и 28 сут твердения, 1:1: 1:2 – соотношение гипс:пепел по массе

Зависимости предела прочности при изгибе и сжатии от дозировки ПЩ в составе комбинированного вяжущего описываются формулой:

$$R_f, R = a + bЦ + cЦ^2, \quad (3.3)$$

где R_f, R – предел прочности при изгибе и сжатии, МПа; $Ц$ – дозировка портландцемента в составе вяжущего, %; a, b, c – коэффициенты, значения которых представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Параметры уравнения ф. (3.3)

Предел прочности	Параметры уравнения ф. (3.3)							
	Через 2 ч				Через 28 сут			
	a	b	c	R^2*	a	b	c	R^2*
при изгибе 1:1**	2,1	3,37	-14,2	0,87	3,8	2,18	-7,1	0,83
	1,3	4,71	-20,3	0,89	2,4	3,32	-7,9	0,93
при сжатии 1:1	4,6	11,95	-43,7	0,94	7	9,0	-28,7	0,96
	2,4	14,0	-58,2	0,99	5,6	6,58	-29,5	0,99

Примечание: * – показатель достоверности аппроксимации: ** - гипс:пепел

Анализ полученных результатов показывает:

- увеличение предела прочности при изгибе при введении в состав смеси ПЦ в зависимости от дозировки и сроков твердения составляет от 1,05 до 1,1 раза при соотношении гипс : пепел = 1 : 1 и от 1,125 до 1,23 раза при соотношении гипс : пепел = 1 : 2, при этом максимальное повышение обеспечивается при дозировке ПЦ 20 % от массы гипса при соотношении гипс : пепел = 1 : 1 и 10 % при соотношении гипс : пепел = 1 : 2;

- увеличение предела прочности при сжатии при введении в состав смеси ПЦ в зависимости от доли ПЦ в составе комбинированного вяжущего и сроков твердения составляет от 1,1 до 1,17 раза при соотношении гипс : пепел = 1 : 1 и от 1,05 до 1,375 раза при соотношении гипс : пепел = 1 : 2, при этом максимальное повышение обеспечивается при доле ПЦ=0,2 в составе комбинированного вяжущего при соотношении гипс : пепел = 1 : 1 и 0,1 при соотношении гипс : пепел = 1 : 2.

Исследования водостойкости комбинированным вяжущих по таблице 3.3 показало:

- при соотношении гипс : пепел = 1:1 коэффициент размягчения возрастает с 0,45 у вяжущего без ПЦ до 0,7 у комбинированного вяжущего при дозировке ПЦ до 20 % от массы гипса;

- при соотношении гипс : пепел = 1:2 коэффициент размягчения возрастает с 0,4 у вяжущего без ПЦ до 0,6 у комбинированного вяжущего при дозировке ПЦ до 10 % от массы гипса, что позволяет отнести рассматриваемые гипсопеплоцементнобетонные композиты к материалам повышенной водостойкости.

Зависимость предела прочности при изгибе R_f от предела прочности при сжатии R представленных в таблице 3.2 комбинированных вяжущих представлена на рисунке 3.6.

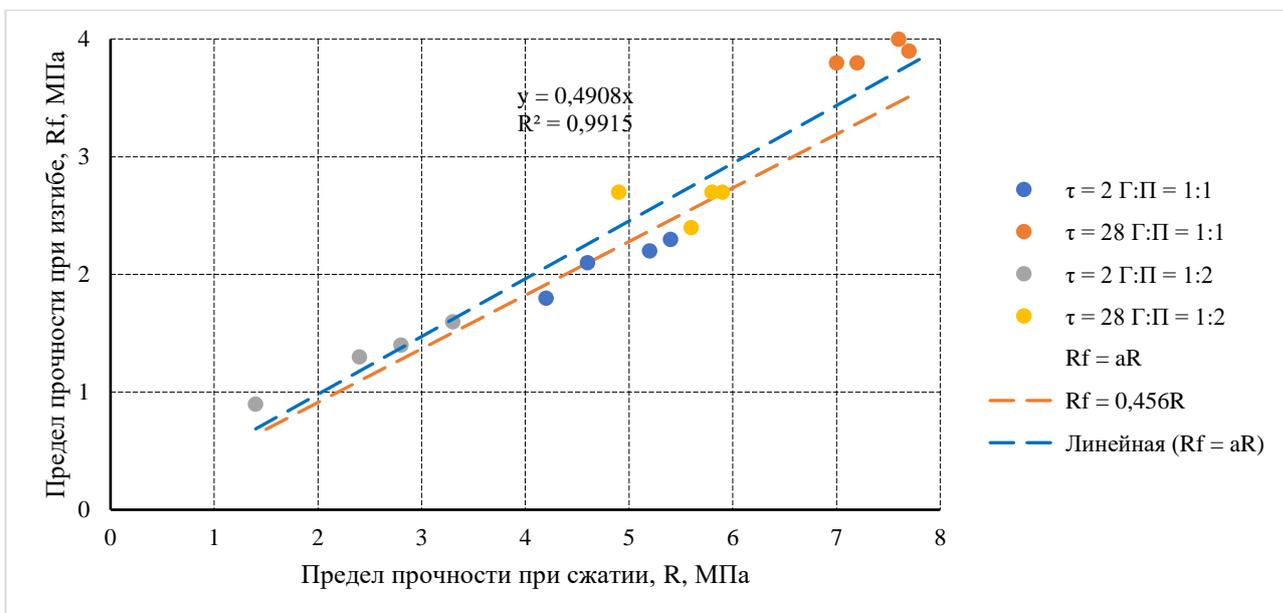


Рисунок 3.6 – Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии исследованных вяжущих по таблице 3.2

2, 28 – соответственно через 2 ч и 28 сут твердения; Γ : Π – гипс : пепел

Представленная на рисунке 3.6 зависимость предела прочности при изгибе R_f от предела прочности при сжатии R комбинированных вяжущих по таблице 3.3 описывается уравнением:

$$R_f = 0,491R, \quad (3.4)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$.

Анализ полученных результатов показывает, что:

- соотношение R_f/R гипсоцементного вяжущего в возрасте 2 ч и в возрасте 28 сут мало зависит от соотношения гипс : пепел;

- соотношение по ф. (3.4) в 1,07 раза превышает соотношение по ф. (3.2), что можно рассматривать как «вклад», пусть даже достаточно скромный, пепла в повышение трещиностойкости строительного композита на комбинированном вяжущем.

3.2. Свойства фиброгипсопеплоцементнобетонных композитов

Гипсопеплоцементнобетонная матрица получена с использованием комбинированного вяжущего $\Gamma + \Pi = 80 + 20$ при соотношении $\Gamma : \Pi$ (фракция 0...5 мм)

= 1 : 1 использована для исследования свойств гипсопеплоцементнобетонных композитов (строительных растворов), армированных с целью повышения трещиностойкости базальтовыми волокнами. Исследовано влияние процента армирования по объему μ и соотношения «длина волокна/диаметр волокна» l/d . В таблице 3.4 представлены строительно-технические свойства матрицы.

Таблица 3.4 – Строительно-технические свойства гипсопеплоцементнобетонной матрицы

Г : П, по массе	Доля цемента, %	Свойства матрицы				
		ρ^* в возрасте 28 сут, кг/м ³	R_f (МПа) в возрасте		R (МПа) в возрасте	
			2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	2	3	4	5	6	7
1:1	20	1195	2,3	4,0	5,4	7,6

Примечание: * – средняя плотность; R_f – предел прочности при изгибе; R – предел прочности при сжатии

Исследования строительно-технических свойств фиброгипсопеплоцементнобетонных растворов в зависимости от варьируемых факторов реализованы с использованием методов математического планирования эксперимента [162-165]. В качестве варьируемых факторов приняты:

- процент дисперсного армирования по объему (X_1);
- соотношение длины и диаметра волокон l/d (X_2), этот фактор практически варьировался использованием волокон различной длины.

В качестве исследуемых функций (функция выхода) рассматривались:

- предел прочности при сжатии в возрасте 2 ч и 28 сут R , МПа (Y_1);
- предел прочности при изгибе в возрасте 2 ч и 28 сут R_f , МПа (Y_2).

Матрица планирования эксперимента в кодированных и натуральных переменных представлена в таблице 3.5. Диапазон варьирования переменных принят по результатам предварительных опытов.

Таблица 3.5 – План эксперимента

№ п/п	Переменные						
	натуральные		кодированные				
	x_1	x_2	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$
1	1,1	1444	-1	0	+1	0	0
2	1,5	1444	+1	0	-1	0	0
3	1,4	2221	+0,5	+0,87	+0,25	+0,75	+0,43
4	1,4	667	+0,5	-0,87	+0,25	+0,75	-0,43
5	1,2	2221	-0,5	+0,87	+0,25	+0,75	-0,43
6	1,2	667	-0,5	-0,87	+0,25	+0,75	+0,43
7	1,3	1444	0	0	0	0	0

Результаты исследований свойств композитов через 2 часа после схватывания смеси представлены в таблицах 3.6 и 3.7. Результаты исследований свойств композитов после 28 сут твердения представлены в таблицах 3.8 и 3.9.

Таблица 3.6 – Предел прочности при сжатии через 2 ч

N/N	Единичные результаты функции выхода R, МПа						Сред. знач. R, МПа
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
1	5,85	5,90	5,92	5,85	5,83	5,81	5,85
2	5,75	5,77	5,65	5,73	5,77	5,63	5,71
3	5,09	5,07	5,11	5,08	4,97	4,98	5,06
4	4,97	4,98	4,92	4,92	5,06	5,08	4,98
5	5,46	5,54	5,35	5,35	5,35	5,35	5,41
6	5,11	5,11	5,07	5,05	5,11	5,06	5,11
7	6,36	6,34	6,29	6,30	6,18	6,22	6,29

Таблица 3.7 – Предел прочности при изгибе через 2 ч

N/N	Единичные результаты функции выхода R _f , МПа						Сред. знач. R _f , МПа
	R _{f,1}	R _{f,2}	R _{f,3}	R _{f,4}	R _{f,5}	R _{f,6}	
1	3,61	3,60	3,51	3,55	3,58	3,62	3,57
2	3,51	3,49	3,42	3,40	3,40	3,40	3,43
3	3,22	3,20	3,17	3,18	3,09	3,08	3,17
4	3,12	3,10	3,10	2,99	3,08	3,01	3,06
5	3,24	3,22	3,09	3,13	3,18	3,29	3,20
6	3,29	3,31	3,15	3,18	3,23	3,31	3,24
7	3,71	3,72	3,79	3,71	3,59	3,71	3,70

Таблица 3.8 – Предел прочности при сжатии через 28 сут

N/N	Единичные результаты функции выхода R, МПа						Сред. знач. R, МПа
	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
1	8,71	8,77	8,65	8,58	8,66	8,72	8,67
2	8,69	8,73	8,58	8,61	8,60	8,64	8,63
3	7,71	7,69	7,54	7,61	7,68	7,61	7,65
4	7,51	7,39	7,41	7,27	7,48	7,43	7,41
5	8,13	7,99	7,95	8,21	7,99	7,96	8,03
6	7,78	7,77	7,82	7,71	7,74	7,69	7,74
7	8,99	9,08	9,06	9,31	9,18	9,07	9,11

Таблица 3.9 – Предел прочности при изгибе через 28 сут

N/N	Единичные результаты функции выхода R _f , МПа						Сред. знач. R _f , МПа
	R _{f,1}	R _{f,2}	R _{f,3}	R _{f,4}	R _{f,5}	R _{f,6}	
1	6,66	6,81	6,71	6,78	6,59	6,71	6,72
2	6,48	6,55	6,64	6,52	6,39	6,57	6,52
3	5,76	5,81	5,79	5,91	5,76	5,74	5,81
4	5,48	5,56	5,49	5,49	5,37	5,37	5,45
5	5,81	5,79	5,84	6,01	5,83	5,92	5,86
6	5,98	6,07	6,05	6,03	5,88	5,93	6,00
7	6,95	7,03	7,11	7,08	6,89	6,98	7,00

В результате обработки экспериментальных результатов получены уравнения регрессии общего вида:

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_{11}X_1^2 + b_{22}X_2^2 + b_{12}X_1X_2, \quad (3.5)$$

значения коэффициентов которых представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Значения коэффициентов уравнений регрессии ф. (3.5)

Коэффициенты в ф.(3.5)	Вид прочности			
	при сжатии в возрасте		при изгибе в возрасте	
	2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
b_0	6,27	9,1	3,71	7,01
b_1	-0,12	-0,08	-0,08	-0,09
b_2	0,11	0,04	-	-0,06
b_{11}	-0,49	-0,45	-0,2	-0,4
b_{22}	-1,35	-1,48	-0,66	-1,36
b_{12}	-0,13	-0,03	0,09	0,02

В результате анализа экспериментальных результатов получены зависимости пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R исследованных композитов в виде уравнений общего вида:

$$R_f, R = a + bЦ + cЦ^2, \quad (3.6)$$

где R_f, R – предел прочности при изгибе и сжатии, МПа;

l/d – отношение длины волокна к диаметру;

a, b, c – коэффициенты, значения которых представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Параметры уравнения ф. (3.6)

Предел прочности	Параметры уравнения ф. (3.6)						
	Через 2 ч			Через 28 сут			
	a	b	c	a	b	c	
при изгибе 1,1**	2,68	0,0007	$-3 \cdot 10^{-7}$	4,53	0,0018	$-7 \cdot 10^{-7}$	
	1,3	3,22	0,0007	$-3 \cdot 10^{-7}$	5,79	0,0018	$-7 \cdot 10^{-7}$
	1,5	2,34	0,001	$-3 \cdot 10^{-7}$	4,34	0,0016	$-7 \cdot 10^{-7}$
при сжатии 1,1	0,79	0,0068	$-2 \cdot 10^{-6}$	3,49	0,0072	$-2 \cdot 10^{-6}$	
	1,3	1,4	0,068	$-2 \cdot 10^{-6}$	3,91	0,0071	$-2 \cdot 10^{-6}$
	1,5	1,03	0,0068	$-2 \cdot 10^{-6}$	3,44	0,0071	$-2 \cdot 10^{-6}$

Примечания: показатель достоверности аппроксимации во всех случаях $R^2 = 1,0$:

** – процент армирования по объему

Графическая интерпретация уравнений ф. (3.6) представлена на рисунках 3.7, 3.8.

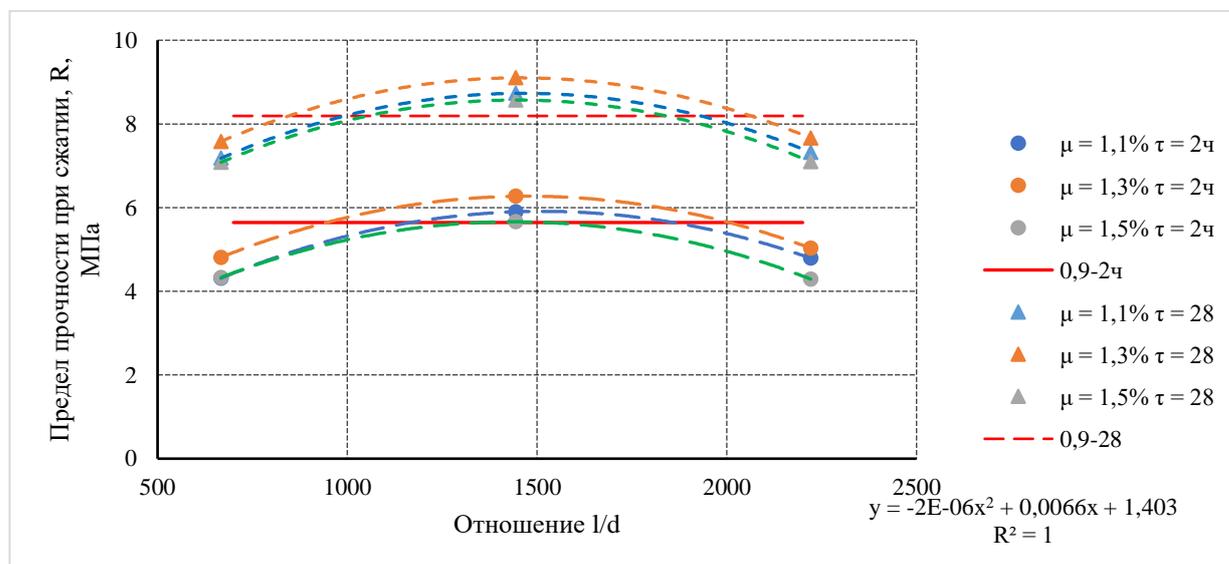


Рисунок 3.7 – Зависимость предела прочности при сжатии исследованных композитов от соотношения длина волокна/диаметр l/d

2 ч, 28 – время твердения 2 ч и 28 сут; 0,9-2ч, 0,9-28 – 90 % уровень от максимума в 2 ч и 28 сут

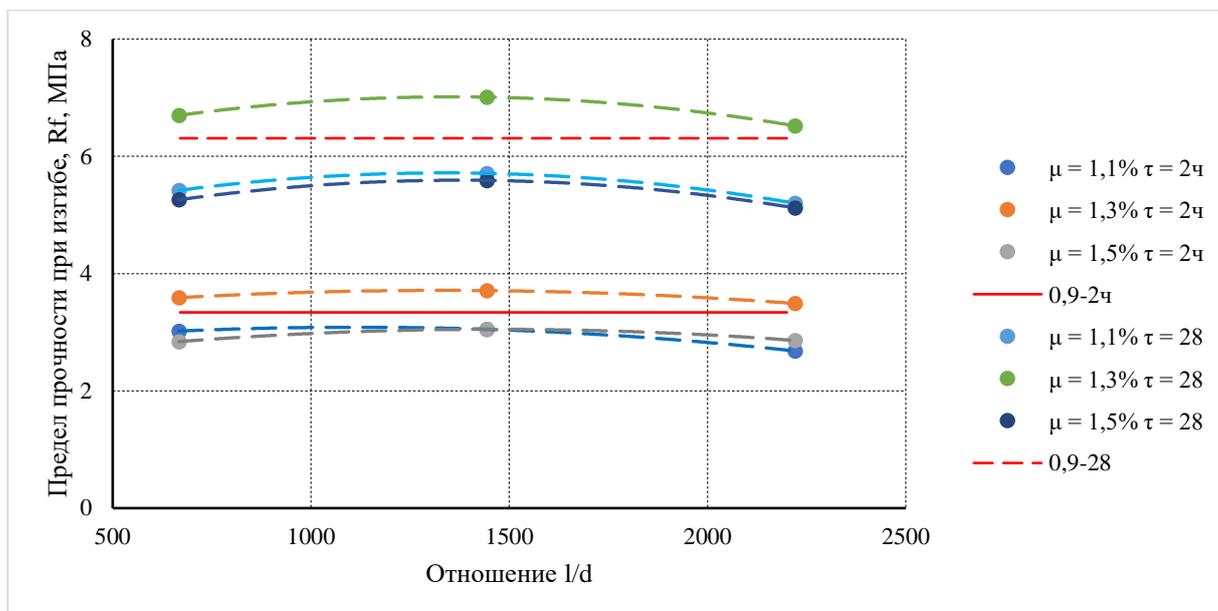


Рисунок 3.8 – Зависимость предела прочности при изгибе исследованных композитов от соотношения длина волокна/диаметр (l/d)

2 ч, 28 – время твердения 2 ч и 28 сут; 0,9-2ч, 0,9-28 – 90 % уровень от максимума в 2 ч и 28 сут

Из представленных на рисунках 3.7, 3.8 и в таблицах 3.5–3.11 результатов следует, что:

- максимальное значение предела прочности при сжатии R как через 2 ч твердения, так и в возрасте 28 сут имеет место при значении отношения длины волокна l к диаметру d равном 1444, повышение предела прочности относительно других параметров армирования через 2 ч достигает 36 %, а через 28 сут – 20 %;

- влияние процента армирования по объему μ менее выраженное, относительно минимальных значений прочности максимальные достигают 10 % через 2 ч и 6 % через 28 сут, при этом максимум имеет место при проценте армирования 1,3;

- уровень прочности не менее 90 % от максимального значения прочности имеет место при отношении l/d в диапазоне от 1100 до 1800;

- максимальное значение предела прочности при изгибе R_f как через 2 ч твердения, так и в возрасте 28 сут имеет место при значении отношения длины

волокна l к диаметру d равном 1444 как через 2 ч твердения, так и в возрасте 28 сут, при этом повышение предела прочности относительно других параметров армирования не превышает 7 %;

- влияние процента армирования по объему μ менее выраженное, относительно минимальных значений прочности максимальные достигают всего 3 % через 2 ч и 6 % через 28 сут, при этом максимум имеет место при проценте армирования 1,3;

- уровень прочности не менее 90 % от максимального значения прочности имеет место при любом отношении l/d при коэффициенте армирования $\mu = 1,3$ %;

- повышение предела прочности при сжатии R вследствие дисперсного армирования достигает 16 % в возрасте 2 ч и 19 % в возрасте 28 сут, а при изгибе соответственно на 69 % и 75 % относительно неармированного бетона аналогичного состава.

Кинетика прочности при сжатии исследованных композитов представлена на рисунке 3.9.

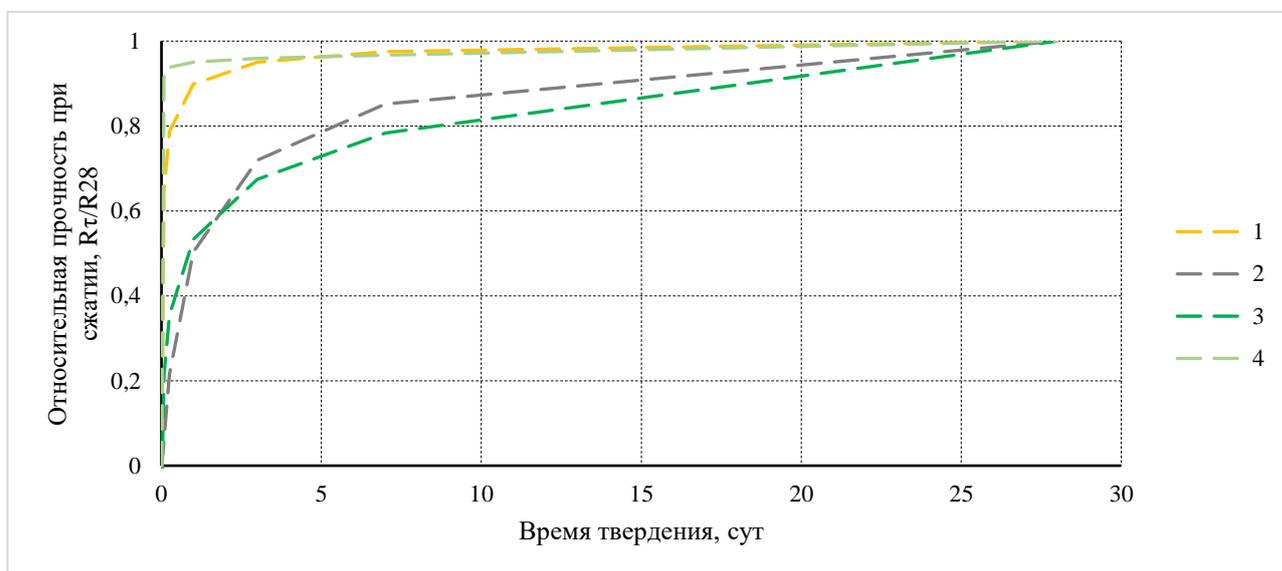


Рисунок 3.9 – Зависимость относительной прочности при сжатии от времени твердения

1 – исследованные композиты; 2 – особобыстротвердеющие портландцементные бетоны [166]; 3 – глиноземистый цемент по ГОСТ 969-2019; 4 – по данным [167] для растворов на смешанном вяжущем ПЦ+ГЦ

Из представленных на рисунке 3.9 результатов очевидно, что исследованные композиты характеризуются весьма высоким темпом твердения, значительно превосходящим и особобыстротвердеющие портландцементные бетоны, и бетоны на основе глиноземистого цемента. Кинетика нарастания прочности исследованных композитов описывается уравнением:

$$R_{\tau} = R_{28} \exp\left(k \left(1 - \sqrt{\frac{28}{\tau}}\right)\right) \quad (3.7)$$

при $k = 0,025$, тогда как для особобыстротвердеющих портландцементных бетонов, обеспечивающих в суточном возрасте 50 % проектной прочности, значение $k = 0,16$ [166].

Параметры армирования влияют на соотношение R_f/R , и соответствующая зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии исследованных композитов представлена на рисунке 3.10.

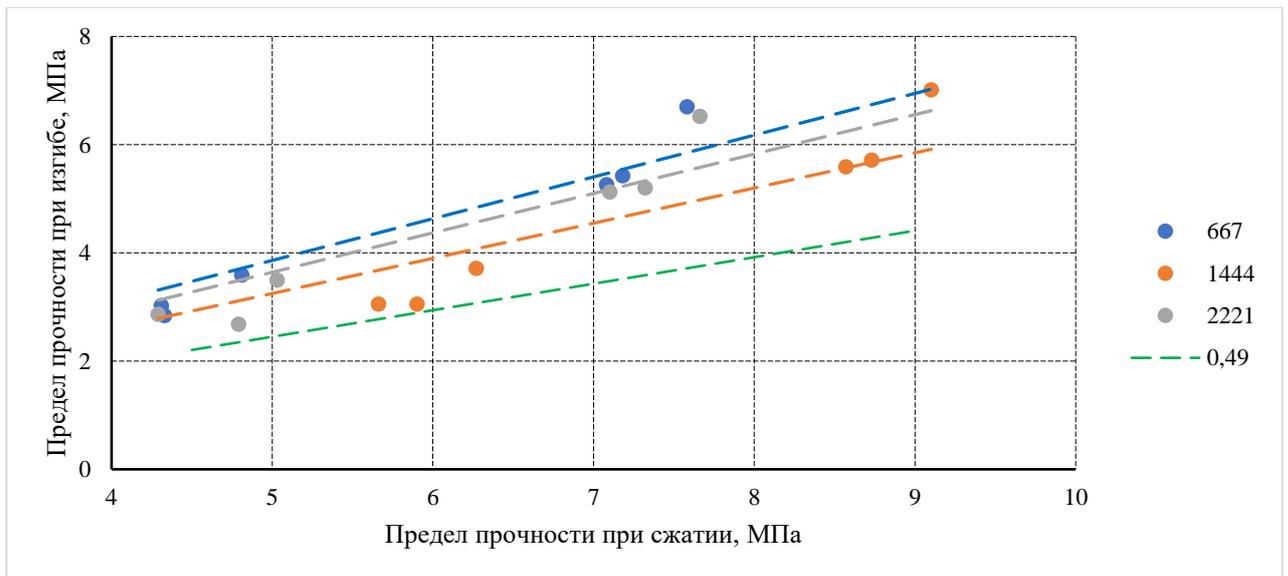


Рисунок 3.10 – Зависимость предела прочности при изгибе R_f исследованных композитов от предела прочности при сжатии R
 667-2221 – соотношение l/d волокон; 0,49 – соотношение R_f/R по представленным на рисунке 3.6 результатам

Отношение R_f/R предела прочности при изгибе исследованных композитов к пределу прочности при сжатии описывается уравнением:

$$R_f = kR, \quad (3.8)$$

параметры которого в зависимости от показателей армирования представлены в таблице 3.12.

Таблица 3.12 – Параметры уравнения ф. (3.8)

Отношение l/d	Параметры уравнения ф. (3.8)	
	k	$R^2 *$
667	0,77	0,99
1444	0,65	0,98
2221	0,73	0,98

Анализ представленных на рисунке 3.10 и в таблице 3.12 результатов показывает, что повышение соотношения R_f/R для армированных композитов составляет в зависимости от коэффициента армирования от 1,32 до 1,57 раза, т.е. дисперсное армирование, как уже было показано выше, при относительно невысоком повышении предела прочности при сжатии R обеспечивает значительное повышение предела прочности при изгибе R_f .

В развитие исследований по оценке влияния параметров армирования на свойства изучаемых бетонов на многокомпонентных вяжущих произведено сравнение эффективности применения в качестве дисперсного армирования гипсопеплоцементной матрицы комбинированного армирования базальтовыми и полипропиленовыми волокнами, представленными полипропиленовой фиброй RS производства Руссеал длиной 12 мм и базальтовыми волокнами длиной 13 мм производства ПАО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с с величиной $l/d = 1444$.

Композиты изготавливались из смесей, приготовление которых производилось в смесителе принудительного действия посредством введения в воду предварительно всухую перемешанной смеси Г+ПЩ+П (гипс + портландцемент + пепел) совместно с базальтовыми и полипропиленовыми волокнами с последующим перемешиванием всех компонентов до получения однородной фиброгипсопеплоцементобетонной смеси. Формование образцов размером 4x4x16 см

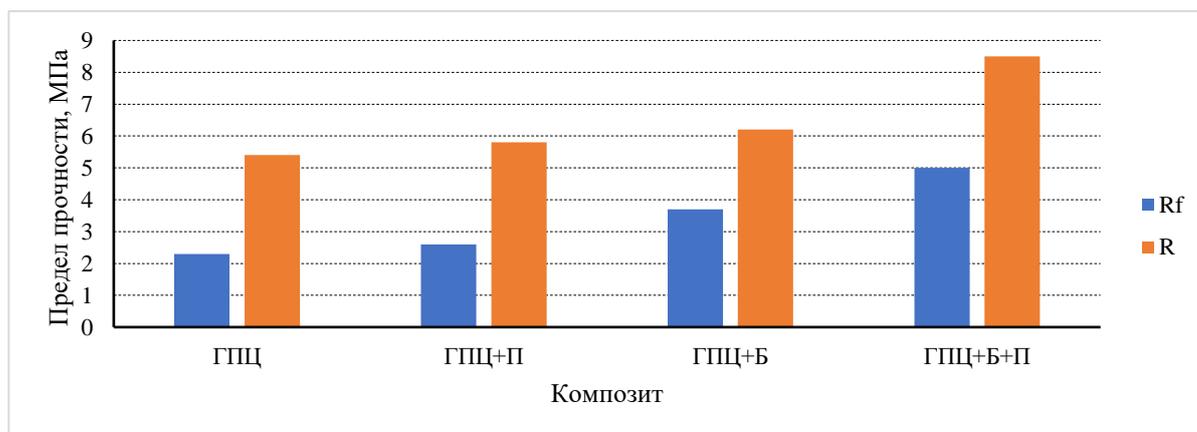
осуществлялось литьевым способом с последующим выдерживанием в воздушно-сухих условиях. Испытание образцов выполнялось в соответствии с ГОСТ 23789–2018.

В таблице 3.13 представлены составы исследованных фиброгипсопеплоцементобетонных смесей.

Таблица 3.13 – Составы и свойства фиброгипсопеплоцементобетонных КОМПОЗИТОВ

Со- ставы	Соотношение компонентов в смеси, мас. %					Свойства бетона					
	гипс	пепел	цемент	волокно		вода	плот- ность, кг/м ³	предел проч- ности при из- гибе (МПа) в возрасте		предел проч- ности при сжатии (МПа) в возрасте	
				ба- заль- товое	поли- пропи- лено- вое			2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
	1	28,6	35,7	7,1	–	–	28,6	1195	2,3	4,0	5,4
2	28,3	34,9	7,1	1,1	–	28,6	1197	3,6	6,7	5,9	9,7
3	28,3	34,8	7,0	1,3	–	28,6	1195	3,7	6,9	6,2	10,5
4	28,2	34,7	7,0	1,5	–	28,6	1198	3,4	6,5	5,7	9,5
5	28,3	34,9	7,1	–	0,35	29,35	1187	2,5	4,3	5,6	8,7
6	28,3	34,8	7,0	–	0,42	29,48	1185	2,6	4,5	5,8	8,9
7	28,2	34,7	7,0	–	0,48	29,62	1188	2,4	4,2	5,5	8,6
8	28,3	34,55	7,1	1,1	0,35	28,6	1190	4,8	8,9	8,1	13,4
9	28,3	34,38	7,0	1,3	0,42	28,6	1192	5,0	9,2	8,5	14,5
10	28,2	34,22	7,0	1,5	0,48	28,6	1194	4,5	8,7	7,8	13,1

На рисунках 3.11 и 3.12 представлены результаты испытаний образцов на прочность в возрасте 2 ч и 28 сут составов № 1,3,6,9 по таблице 3.13 при следующих параметрах армирования: полипропиленовая фибра (П) 0,42 %; базальтовое волокно (Б) 1,3 %.



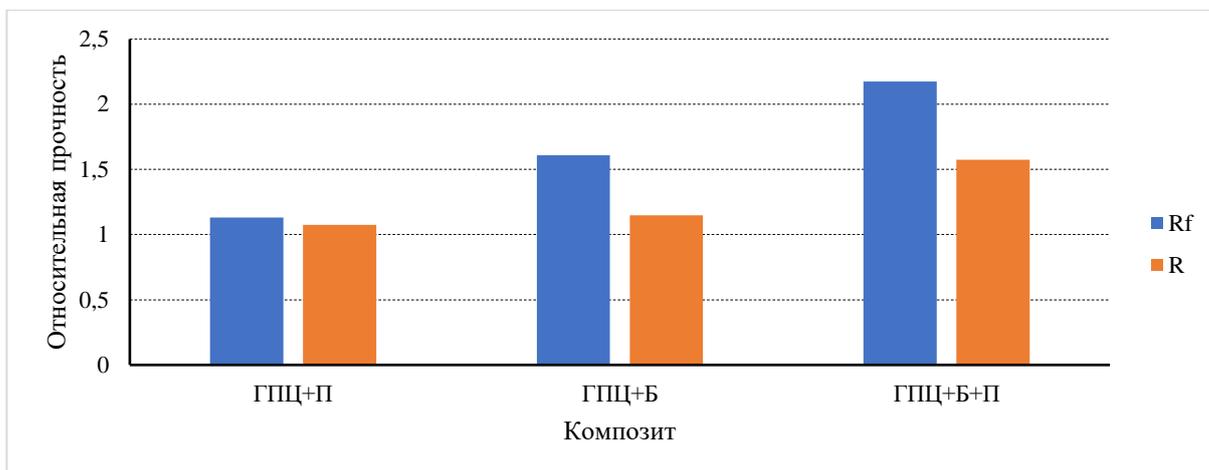


Рисунок 3.11 – Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов различного состава в возрасте 2 ч

Вверху – абсолютные, внизу – относительно неармированного состава;
ГПЦ – гипс+пепел+цемент

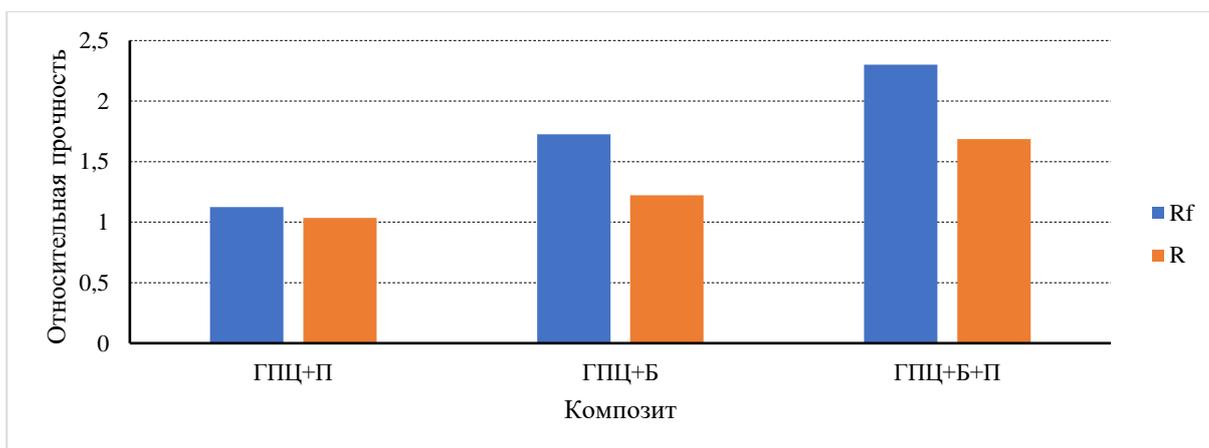
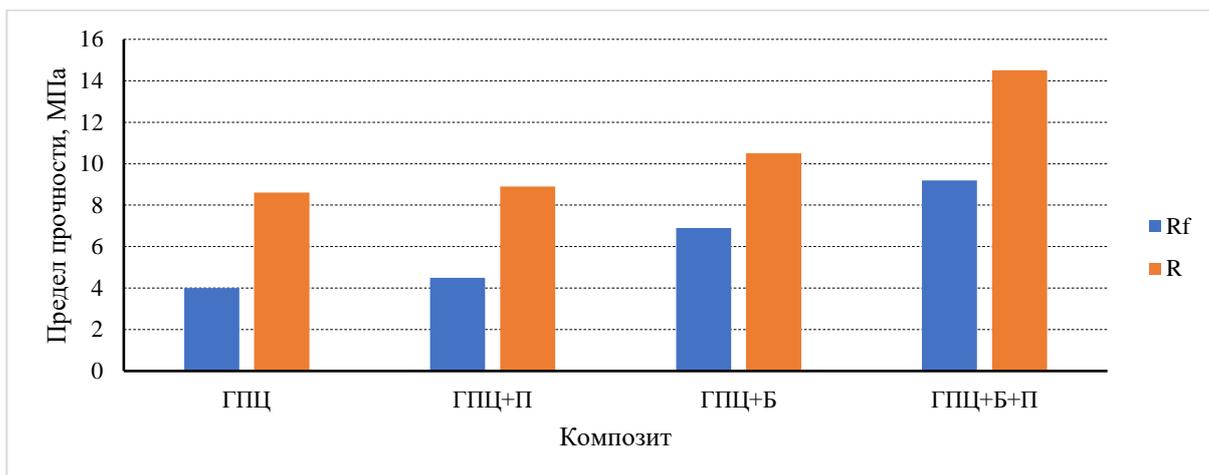


Рисунок 3.12 – Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов различного состава в возрасте 28 сут

Вверху – абсолютные, внизу – относительно неармированного состава;
ГПЦ – гипс+пепел+цемент

На рисунке 3.13 представлена зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов с учетом таких факторов, как параметры армирования и время твердения.

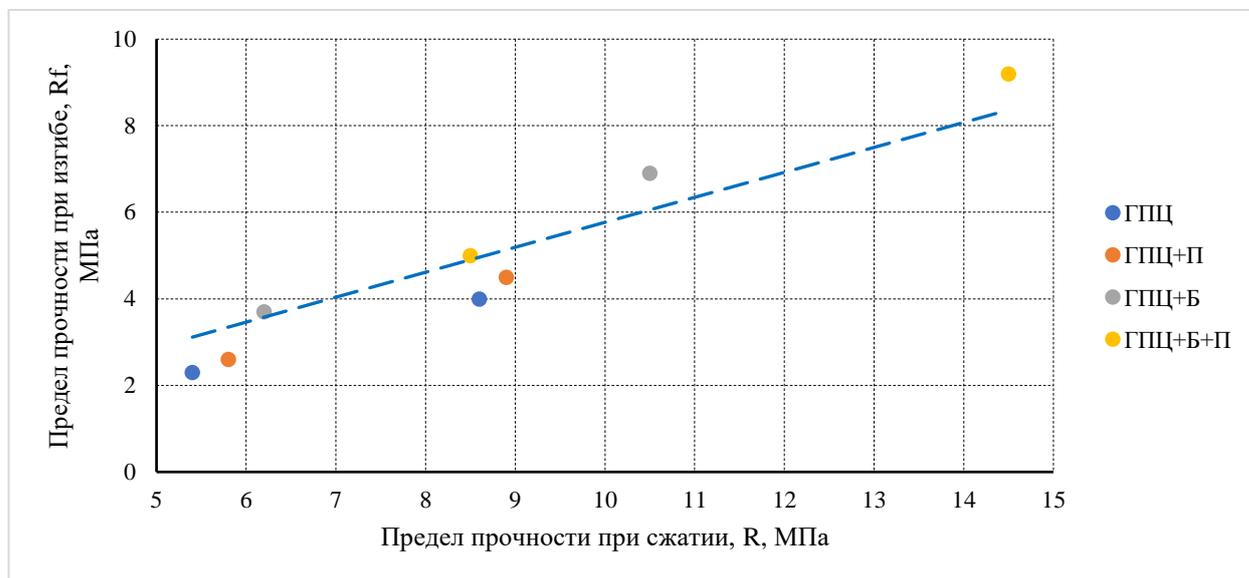


Рисунок 3.13 – Зависимость предела прочности при изгибе R_f исследованных композитов от предела прочности при сжатии R
ГПЦ... ГПЦ+Б+П – композиты по таблице 3.14

Представленная на рисунке 3.13 зависимость независимо от исследуемых факторов описывается уравнением:

$$R_f = 0,58R \quad (3.9)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$.

Из представленных на рисунках 3.11 – 3.13 результатов очевидно, что:

- при армировании полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии возрастает незначительно, от 3 до 7 % в зависимости от возраста композита, увеличение предела прочности при изгибе достигает 13 %;

- при армировании базальтовым волокном предел прочности при сжатии возрастает от 1,15 до 1,22 раза в зависимости от возраста композита, увеличение предела прочности при изгибе составляет от 1,61 раза через 2 ч до 1,73 раза через 28 сут;

- при армировании базальтовым волокном в сочетании с полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии возрастает от 1,67 раза через 2 ч до 1,68 раза через 28 сут, увеличение предела прочности при изгибе составляет от 2,17 раза через 2 ч до 2,3 раза через 28 сут;

- параметры армирования не оказывают значительного влияния на зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов.

3.3. Влияние технологических факторов на свойства фиброгипсоцементнопеплобетонного композита

Приготовление фиброгипсоцементнопеплобетонных смесей осуществлялось в турбулентном смесителе. Распушка базальтовых армирующих волокон происходила одновременно с перемешиванием. Компоненты смеси загружались в воду, при этом исследовалось влияние очередности загрузки компонентов на свойства композитов. Перед загрузкой в воду смесь компонентов тщательно перемешивалась вручную. При исследовании влияния очередности загрузки реализованы следующие схемы загрузки:

- схема 1 – все компоненты одновременно;
- схема 2 – на первом этапе все компоненты, кроме пепла фракции 0,315-5,0 мм, после достижения однородной консистенции смеси на втором этапе вводился пепел фракции 0,315-5,0 мм;
- схема 3 – на первом этапе все компоненты, кроме базальтовых (полипропиленовых, базальтовых+полипропиленовых) волокон, после достижения однородной консистенции смеси на втором этапе вводились базальтовые (полипропиленовые, базальтовые+полипропиленовые) волокна.

На рисунке 3.14 представлены схемы 1 и 2 приготовления фиброгипсоцементнопеплобетонной смеси.

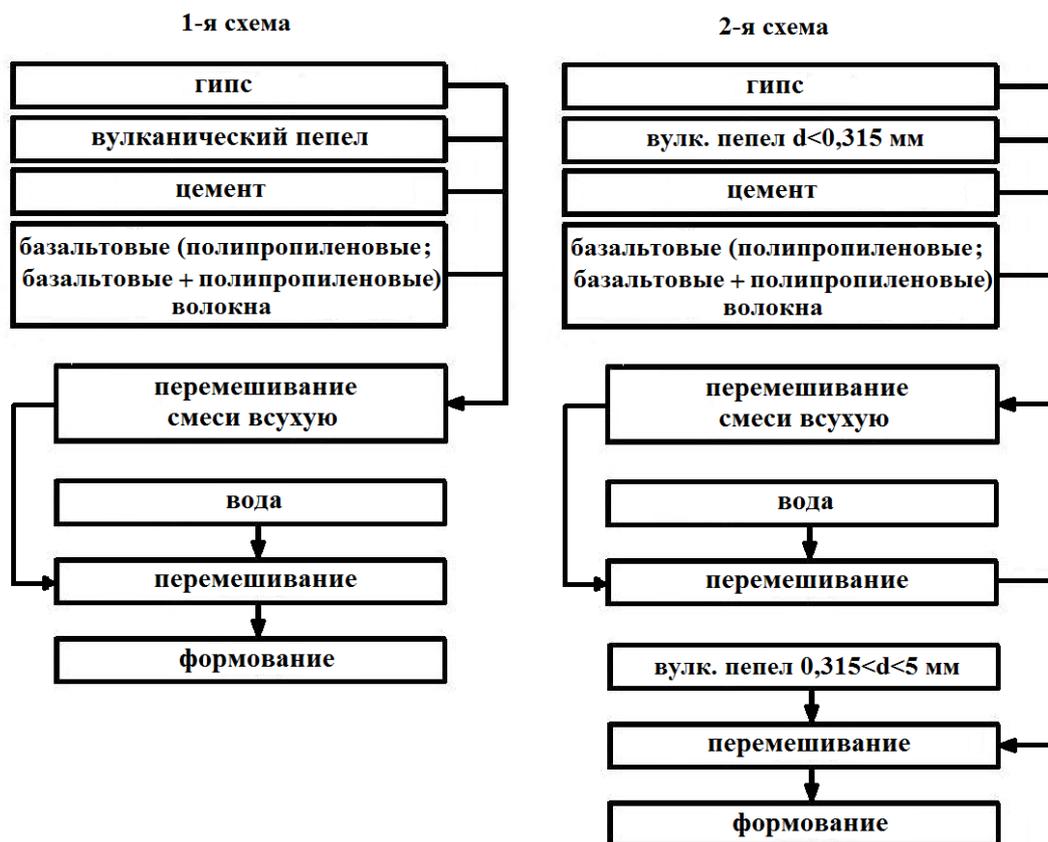


Рисунок 3.14 – Схемы 1 и 2 приготовления фиброгипсоцементнопеплобетонной смеси

В результате анализа полученных результатов установлено, что:

- распушка и равномерное распределение базальтовых (полипропиленовых, базальтовых+полипропиленовых) волокон в смеси имели место при реализации только схемы 1 и 2, в связи с чем схема 3 далее не рассматривалась;
- сокращение общее времени перемешивания имело место при реализации схемы 1.

С целью устранения таких общеизвестных недостатков композитов на основе гипсовых вяжущих, как низкая прочность и трещиностойкость, высокая остаточная влажность, которые имеют место вследствие повышенного водосодержания смеси исследовано влияние возможности снижения водосодержания смеси посредством отдельного пофракционного введения пепла в состав при приготовлении смеси, т.е. двухстадийного введения пепла – на первом этапе фракции до 0,315 мм 33 % от общей массы пепла как компонента вяжущего и на

втором этапе фракции 0,315 – 5,0 мм 67 % от общей массы пепла в качестве мелкого заполнителя. При этом общее время перемешивания смеси возрастало относительно схемы 1. Следует отметить, что подобная схема приготовления фибропеплобетонной смеси реализована в [14, 168].

Таблица 3.14 содержит результаты исследования влияния вышеуказанных технологических параметров приготовления смеси, предназначенной для формирования изделий методом литья. В таблице 3.15 приведены составы фиброгипсоцементнопеплобетонной смеси и способы формирования: методы литья, вибрирования на виброплощадке (частота колебаний – 50 Гц, амплитуда колебаний – 0,5 мм) и вибрирования с инерционным пригрузом, являющийся разновидностью метода вибропрессования. Величину пригруза при вибропрессовании смеси принимали равной 4 Па, по рекомендациям [169], исходя из этого, определяли водовязущее отношение. Подвижность фиброгипсоцементнопеплобетонной смеси при формировании образцов вибрированием составляла 5 – 7 см по погружению эталонного конуса, а при формировании вибрированием с пригрузом – 1 – 3 см.

Таблица 3.14 – Состав и свойства фиброгипсоцементнопеплобетонного композита

№ №	Состав смеси, % по массе			Вода / вяжу- щее	Базальто- вые во- локна, % по объему	Полипропи- леновая фибра, % по объему	Приго- товление смеси	Предел прочности, МПа	
	Г	П 0-5мм	ПЦ					R_f	R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	40,0	50,0	10,0	0,68	1,3	–	схема 1	7,0	9,1
2	40,0	50,0	10,0	0,60	1,3	–	схема 2	7,6	10,5
3	40,0	50,0	10,0	0,68	–	1,2	схема 1	4,5	7,7
4	40,0	50,0	10,0	0,60	–	1,2	схема 2	4,9	8,9
5	40,0	50,0	10,0	0,68	1,3	1,2	схема 1	9,3	12,5
6	40,0	50,0	10,0	0,60	1,3	1,2	схема 2	10,2	14,5

Таблица 3.15 – Состав фиброгипсоцементнопеплобетонного композита и способы формования изделий

№ № составов	Состав смеси, %			Вода / вяжущее	Базальтовые волокна, % по объему	Полипропиленовая фибра, % по объему	Способ формования
	Г	П	ПЦ				
1	2	3	4	5	6	7	8
1	40,0	50,0	10,0	0,68	1,3	–	литье
2	40,0	50,0	10,0	0,47	1,3	–	вибрирование
3	40,0	50,0	10,0	0,41	1,3	-	вибрирование с пригрузом
4	40,0	50,0	10,0	0,68	–	1,2	литье
5	40,0	50,0	10,0	0,47	–	1,2	вибрирование
6	40,0	50,0	10,0	0,41	–	1,2	вибрирование с пригрузом
7	40,0	50,0	10,0	0,68	1,3	1,2	литье
8	40,0	50,0	10,0	0,47	1,3	1,2	вибрирование
9	40,0	50,0	10,0	0,41	1,3	1,2	вибрирование с пригрузом

На рисунке 3.15 приведены показатели прочности фиброгипсоцементнопеплобетонного композита в зависимости от вида фибрового армирования и способа формования изделий.

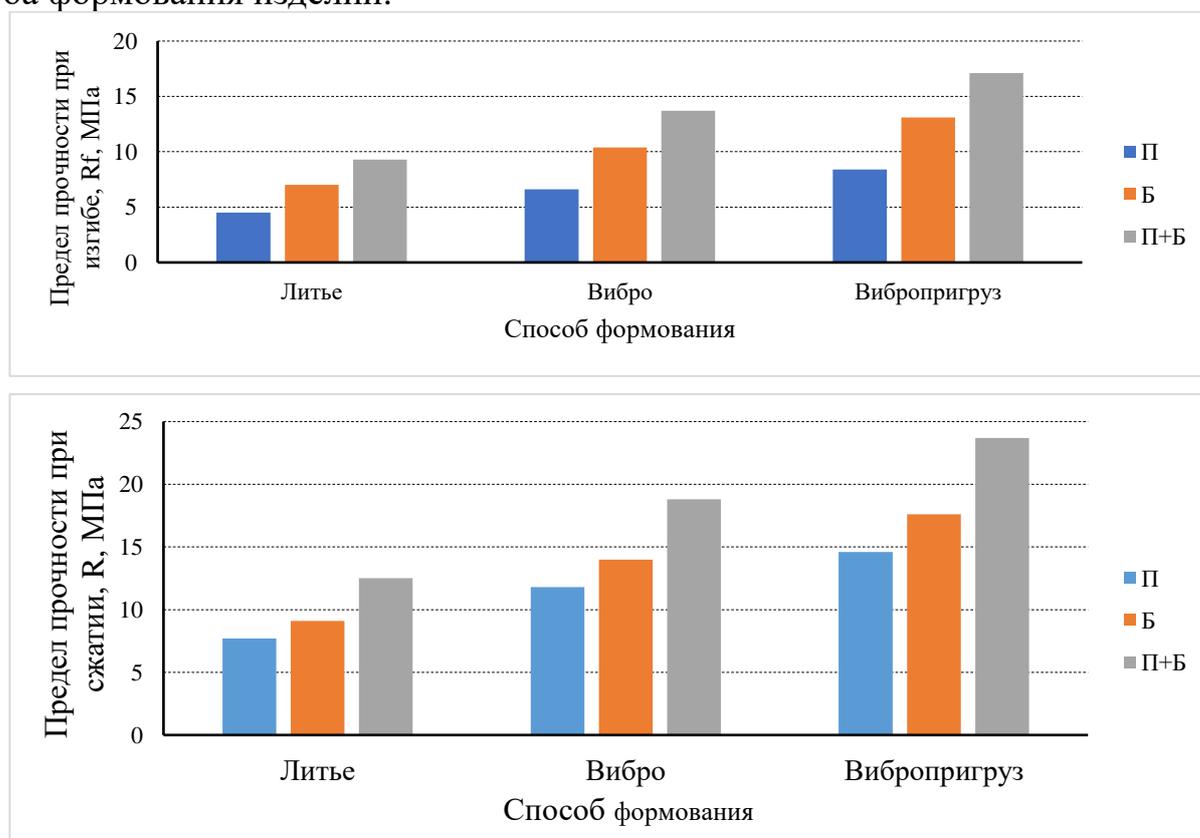


Рисунок 3.15 – Зависимость предела прочности при изгибе (вверху) и сжатии (внизу) исследованных композитов от способов формования и параметров фибрового армирования

П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

На рисунке 3.16 представлена зависимость пределов прочности при сжатии R и изгибе R_f исследованных композитов от величины W/B .

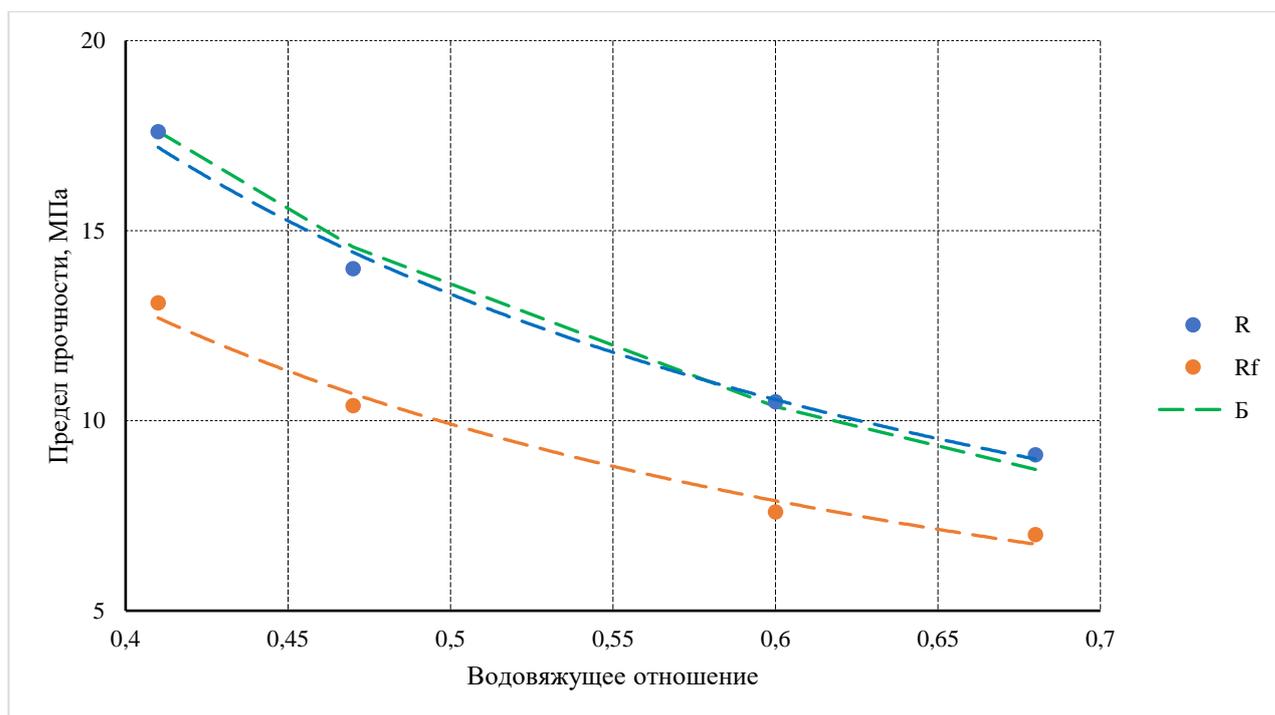


Рисунок 3.16 – Зависимость предела прочности при сжатии и изгибе от водовяжущего отношения исследованных композитов

R – предел прочности при сжатии; R_f – предел прочности при изгибе;

B – зависимость $R = f(W/B)$ для портландцементных бетонов [166]

Зависимости пределов прочности при сжатии от водовяжущего отношения описываются уравнением:

$$R, R_f = k \left(\frac{W}{B} \right)^x, \quad (3.10)$$

где R, R_f – соответственно предел прочности при сжатии и изгибе, МПа;

W/B – водовяжущее отношение.

Параметры уравнений ф. (3.10) представлены в таблице 3.16.

Таблица 3.16 – Параметры уравнений ф. (3.10)

Значения параметров уравнения ф.(3.10)					
при изгибе			при сжатии		
k	x	$R^2 *$	k	x	$R^2 *$
4,17	-1,25	0,98	5,49	-1,29	0,99

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации

Зависимость предела прочности при изгибе R_f от предела прочности при сжатии R составов по таблицам 3.14, 3.15, рисунку 3.15 представлена на рисунке 3.17.

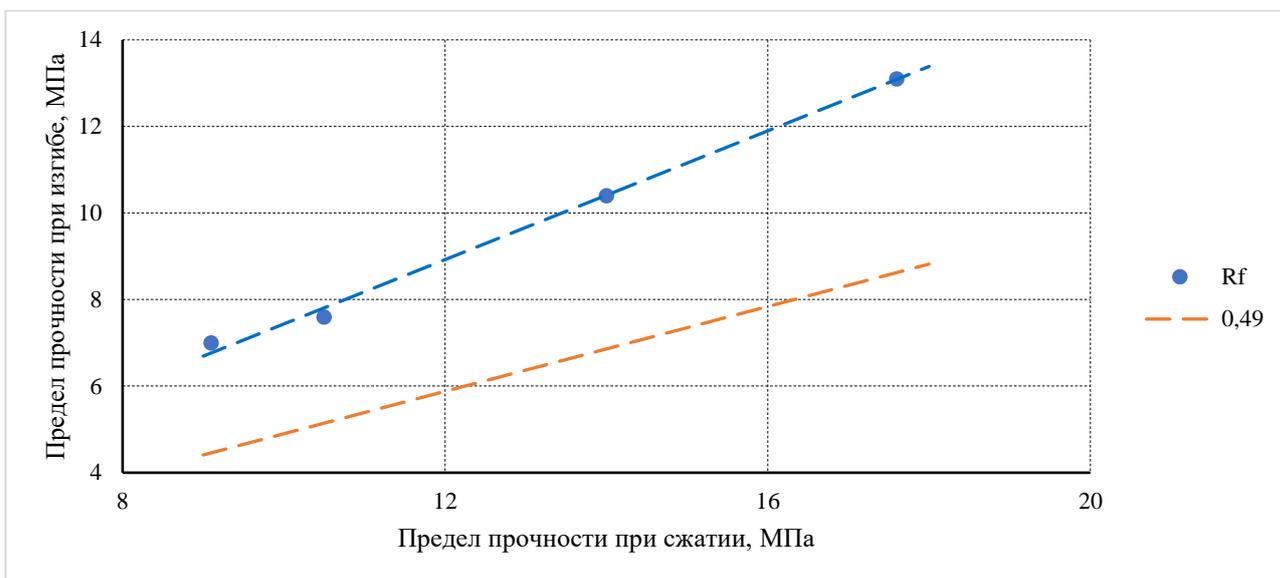


Рисунок 3.17 – Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии исследованных композитов

R_f – композит; 0,49 – соотношение для вяжущего по рисунку 3.6

Представленная на рисунке 3.16 зависимость описывается уравнением:

$$R_f = 0,74R \quad (3.11)$$

с показателем достоверности аппроксимации 0,99.

Анализ представленных в таблицах 3.14, 3.15, и на рисунках 3.15 - 3.17 результатов, позволяет сделать следующие выводы:

- вследствие уменьшения водосодержания смеси при пофракционном введении пепла имеет место рост прочности композита, при этом зависимость $R = f(V/V_{\text{вж}})$ практически идентична закономерности изменения прочности портландцементных бетонов от В/Ц;

- вследствие уменьшения величины водовяжущего отношения при переходе от литевой технологии к вибрационной имеет место повышение предела

прочности при сжатии до 53 %, а при использования пригруза 4 Па по рекомендациям [169] в сочетании с вибрированием повышение предела прочности при сжатии составляет до 93 %;

- вследствие уменьшения величины водовяжущего отношения при переходе от литьевой технологии к вибрационной имеет место повышение предела прочности при изгибе до 49 %, а при вибрировании с пригрузом повышение предела прочности при сжатии составляет до 87 %;

- независимо от способа формования дисперсное и полидисперсное армирование обеспечивает увеличение величины R_f/R примерно в 1,5 раза;

- реализация схемы 1 приготовления смеси применима для смесей независимо от их консистенции, реализация схемы 3 возможна только для смесей под литьевую технологию.

Выводы по третьей главе

1. Введение в состав гипсового вяжущего рациональной дозировки ПЦ 20 % обеспечивает повышение прочности при изгибе до 1,55 раза, при сжатии до 1,57 раза. Введение в состав гипсопеплового вяжущего рациональной дозировки ПЦ 20 % при соотношении гипс : пепел = 1 : 1 обеспечивает повышение предела прочности при изгибе в 1,1 раза, при сжатии в 1,17 раза, при соотношении гипс : пепел = 1 : 2 повышение прочности при изгибе составляет до 1,23 раза, при сжатии 1,37 раза.

2. При соотношении гипс : пепел = 1:1 коэффициент размягчения возрастает с 0,45 у вяжущего без ПЦ до 0,7 у комбинированного вяжущего при дозировке ПЦ до 20 % от массы гипса. При соотношении гипс : пепел = 1 : 2 коэффициент размягчения возрастает с 0,4 у вяжущего без ПЦ до 0,6 у комбинированного вяжущего при дозировке ПЦ до 10 % от массы гипса.

3. Дисперсное армирование базальтовыми волокнами при отношении $l/d = 1444$ и проценте армирования по объему 1,3 обеспечивает повышение предела прочности при сжатии до 36 % через 2 ч и до 20 % через 28 сут относительно других параметров армирования, при этом уровень от максимальной прочности

не менее 90 % обеспечивается при отношении l/d примерно от 1100 до 1800. Дисперсное армирование повышает предел прочности при сжатии на 16 % в возрасте 2 ч и 19 % в возрасте 28 сут, а при изгибе соответственно на 69 % и 75 % в сравнении с показателями матрицы.

4. Полидисперсное армирование базальтовыми ($l/d=1444$; 1,3, мас. %) и полипропиленовыми (длиной 12 мм; 0,42, мас. %) волокнами позволило по сравнению с составами на базальтовых волокнах повысить прочность фиброгипсопеплоцементного композита на сжатие более чем в 1,37-1,38 раза, на изгиб в 1,33-1,35 раза в возрасте 2 часов и 28 суток.

5. Вследствие уменьшения водосодержания смеси при пофракционном введении пепла имеет место рост прочности композита, при этом зависимость $R = f(V/V_{\text{вж}})$ практически идентична закономерности изменения прочности портландцементных бетонов от В/Ц. Вследствие уменьшения величины водовяжущего отношения при переходе от литевой технологии к вибрационной имеет место повышение предела прочности при сжатии до 53 %, а при вибрировании с пригрузом до 93 %. Повышение предела прочности при изгибе составляет соответственно до 49 % и 87 %. Независимо от способа формования дисперсионное и полидисперсное армирование обеспечивает увеличение величины R_f/R примерно в 1,5 раза.

Глава 4. ФИБРОГИПСОЦЕМЕНТНОВЕРМИКУЛИТОБЕТОННЫЕ ТЕПЛООГНЕЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ С ВУЛКАНИЧЕСКИМ ПЕПЛОМ И ПЕМЗОЙ

4.1. Состав и свойства фиброгипсоцементновермикулитобетонных компози́тов

Опыт применения дисперсного армирования гипсоцементновермикулитобетонных композитов, содержащих известь и вулканический туф [170] позволяет считать целесообразным проведение исследований по применению в композитах вулканических пород, в частности, пепла и пемзы, для расширения сырьевой базы с целью производства композитов с улучшенными строительными свойствами.

Изучено влияние на свойства композитов рецептурных факторов, а именно состав смеси, вид активной минеральной добавки (АМД) – вулканические пепел, пемза, вид и содержание волокон, и технологических факторов, а именно способов приготовления смеси и формования изделий. Литые смеси (нормальной густоты) имели диаметр расплыва 180 ± 5 мм, вытекающего из цилиндра при его поднятии. Смеси для формования изделий с уплотнением вибрацией и вибрацией под пригрузом имели меньшее водосодержание. Подвижность фиброгипсоцементновермикулитобетонной смеси с применением вулканического пепла и пемзы при формовании образцов вибрированием составляла 5 – 7 см по погружению эталонного конуса, а при формовании вибрированием с пригрузом – 1 – 3 см. Прочность и средняя плотность композитов определялись на образцах 40x40x160 мм. При приготовлении смесей в смесителе принудительного действия исследовалось влияние очередности загрузки компонентов на свойства композитов. Композиты, содержащие вулканический пепел далее обозначены ГЦПВБ, композиты, содержащие вулканическую пемзу далее обозначены ГЦПмВБ.

В таблице 4.1 представлены результаты оценки влияния рецептурных факторов на предел прочности при изгибе и сжатии и среднюю плотность ГЦПВБ композитов [172].

Таблица 4.1 – Состав смеси и характеристики ГЦПВБ композитов

№№ образцов	Состав смеси			ρ композита, кг/м ³	Предел прочности, МПа			
	Г:В (по объему)	Ц, % от Г, (по массе)	П, % от Ц (по массе)		R_f в возрасте		R в возрасте	
					2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1:2	–	-	629	0,69	1,39	1,01	2,48
2	1:2	20	30	621	0,48	1,08	0,99	2,78
3	1:3	-	-	531	0,39	0,76	0,58	1,59
4	1:3	20	30	479	0,36	0,76	0,78	1,55
5	1:4	–	-	431	0,29	0,51	0,58	0,89
6	1:4	20	20	359	0,34	0,52	0,77	0,88

Примечания: Г – гипс строительный; В – вермикулит; Ц – портландцемент; П – пепел; ρ – средняя плотность; R_f – при изгибе; R – при сжатии

Результаты сопоставления пределов прочности ГЦПВБ композитов и вермикулитобетона на основе строительного гипса при сжатии приведено на рисунке 4.1.

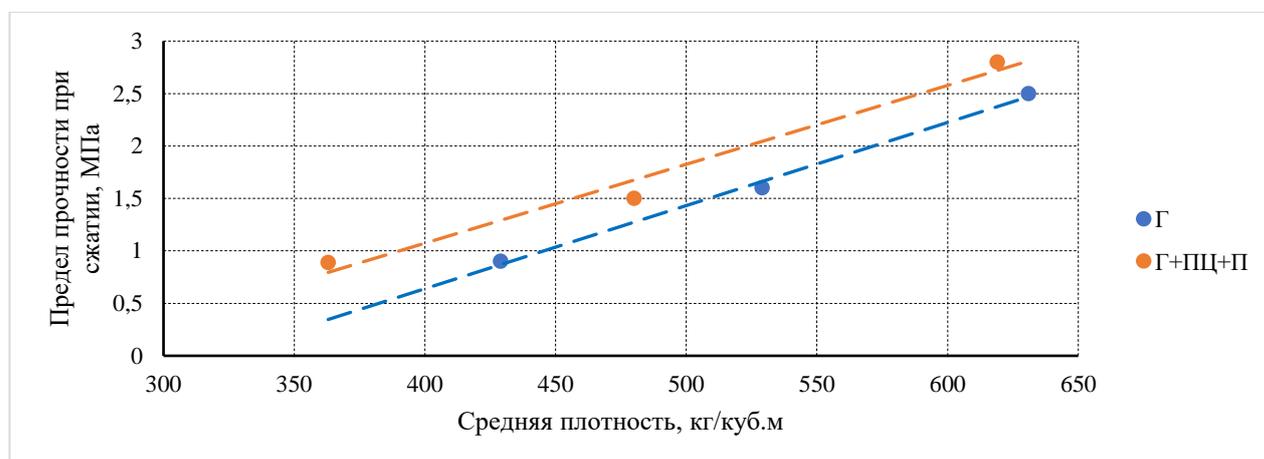


Рисунок 4.1 – Зависимость предела прочности при сжатии от средней плотности

Г – на гипсовом вяжущем; Г+ПЦ+П – на гипсопеплоцементном вяжущем

Пределы прочности при сжатии R ГЦПВБ композита и вермикулитобетона линейно зависят от средней плотности ρ :

$$R = a + b\rho \quad (4.1)$$

параметры уравнения ф. (4.1) представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Параметры уравнения ф. (4.1)

Вязущее					
Гипсовое			Гипсопеплоцементное		
<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2 *$	<i>a</i>	<i>b</i>	$R^2 *$
0,0079	-2,53	0,99	0,0075	-1,93	0,98

Примечание: * – показатель достоверности аппроксимации

Анализ представленных в табл. 4.1 и на рис. 4.1 результатов показывает, что соотношение предела прочности ГЦПВБ композита $R_{ГЦПВБ}$ и предела прочности гипсовермикулитобетона R_G описывается уравнением:

$$\frac{R_{ГЦПВБ}}{R_G} = 6,9 - 0,019\rho + 2 \cdot 10^{-5}\rho^2 \quad (4.2)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,98$.

Зависимость предела прочности при сжатии ГЦПВБ композитов от величины полной пористости в сравнении с вермикулитобетоном на основе строительного гипса представлена на рисунке 4.2.

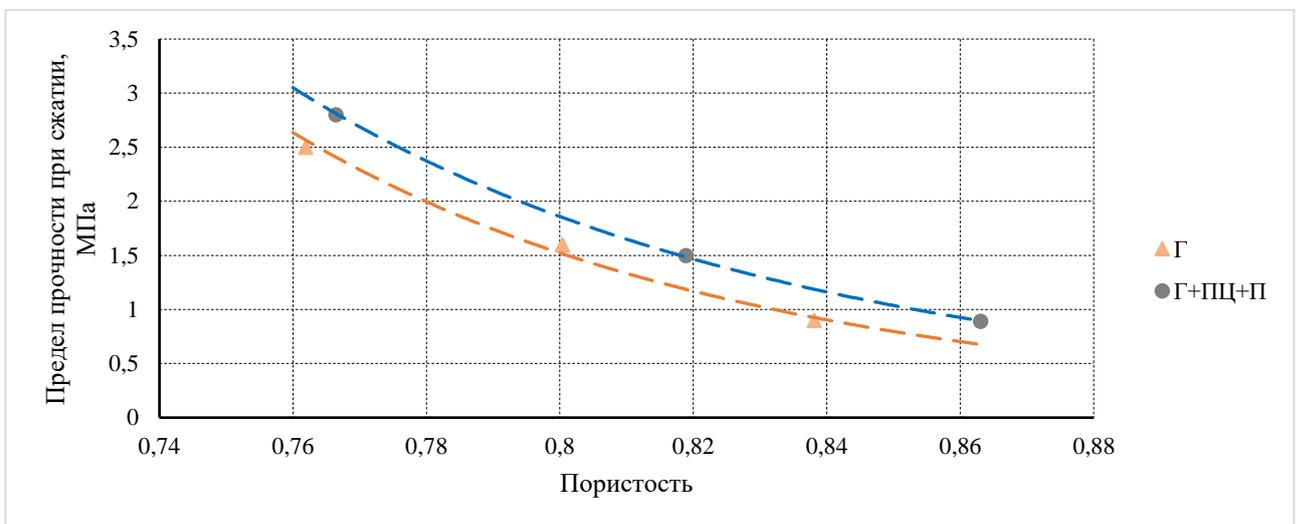


Рисунок 4.2 – Зависимость предела прочности при сжатии от полной пористости

Г – на гипсовом вяжущем; Г+ПЦ+П – на гипсопеплоцементном вяжущем

Пределы прочности при сжатии R ГЦПВБ композита и вермикулитобетона нелинейно зависят от средней плотности ρ :

$$R = aP^x \quad (4.3)$$

параметры уравнения ф. (4.3) представлены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Параметры уравнения ф. (4.3)

Вяжущее					
Гипсовое			Гипсопеплоцементное		
a	x	$R^2 *$	a	x	$R^2 *$
0,14	-10,7	0,99	0,22	-9,65	0,99

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации

Очевидно из приведенных на рисунке 4.2 и в таблице 4.3 данных, что при равной пористости соотношение k предела прочности ГЦПВБ композита $R_{ГЦПВБ}$ и предела прочности гипсовермикулитобетона $R_{Г}$ составляет от $k = 1,21$ при $P = 0,76$ до $k = 1,36$ при $P = 0,86$, что можно интерпретировать как повышенное значение активности ГЦПВ вяжущего относительно строительного гипса, т.е. до 20 - 35 % ПЦ в составе ГЦПВБ можно заменить на вулканический пепел без существенного снижения прочности при сжатии ГЦПВБ композита.

Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии ГЦПВБ композитов в сравнении с вермикулитобетоном на основе строительного гипса представлено на рисунке 4.3.

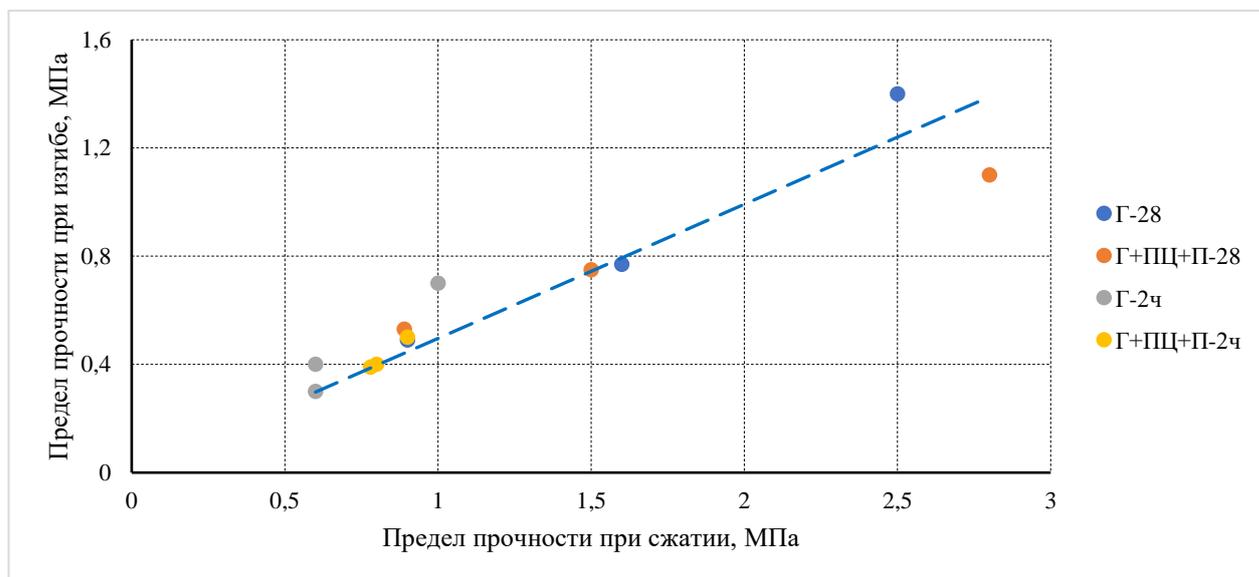


Рисунок 4.3 – Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии

Г – на гипсовом вяжущем; Г+ПЦ+П – на гипсопеплоцементном вяжущем;
2 ч, 28 – соответственно после 2 ч и 28 сут твердения

Предел прочности при изгибе R_f линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = 0,496R, \quad (4.4)$$

показатель достоверности аппроксимации уравнения ф.(4.4) $R^2 = 0,97$, из чего следует вывод, что соотношение R_f/R в данном случае практически не зависит от рецептурных факторов.

Для уменьшения средней плотности ГЦПВБ композитов и улучшения реологических свойств смесей целесообразно применение добавки СДО, поскольку эта широко известная ПАВ, являющаяся побочным продуктом переработки древесины (смола древесная омыленная) [71, 171, 172], обладает одновременно как воздухововлекающим, так и пластифицирующим эффектами и, кроме этого, образование дополнительной пористости может положительно повлиять на огнезащитные свойства вследствие снижения теплопроводности.

Исследовано влияние воздухововлекающей добавки СДО на возможность уменьшения средней плотности и пределов прочности при изгибе и сжатии ГЦПВБ композитов, улучшения удобоукладываемости смеси, а также повышения пределов огнестойкости конструкций с огнезащитным слоем из указанных материалов. Пределы прочности при сжатии и изгибе определялись на образцах – балочках 40x40x160 мм. Пределы прочности при изгибе и сжатии ГЦПВБ композитов определялись в возрасте 2 ч и 28 сут после выдерживания в воздушно-сухих условиях, а средняя плотность в возрасте 28 сут. Значения указанных величин, характеризующие степень влияния добавки СДО на свойства ГЦПВБ композитов, полученных их равноподвижных смесей с диаметром распыла по вискозиметру Суттарда $d = 180 \pm 5$ мм, представлены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Влияние СДО на среднюю плотность и прочность

ГЦПВБ композитов

№№ образцов	Состав смеси			Дозировка СДО, % Г+Ц+П (по массе)	ρ , кг/м ³	Предел прочности, МПа			
	Г:В (по объему)	Ц, % от Г, (по массе)	П, % от Ц (по массе)			R _f в возрасте		R в возрасте	
						2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1:2	20	30	–	621	0,48	1,08	0,89	2,78
2	1:2	20	30	0,1	605	0,5	1,15	0,9	2,9
3	1:2	20	30	0,2	590	0,55	1,2	0,8	2,8
4	1:2	20	30	0,3	585	0,5	1,2	0,75	2,7
5	1:3	20	30	–	480	0,4	0,75	0,8	1,5
6	1:3	20	30	0,1	470	0,45	0,8	0,85	1,55
7	1:3	20	30	0,2	455	0,4	0,75	0,8	1,5
8	1:3	20	30	0,3	450	0,37	0,7	0,75	1,4

Примечания: Г – гипс строительный; В – вермикулит; Ц – портландцемент; П – пепел; ρ – средняя плотность; R_f – при изгибе; R – при сжатии

На рисунке 4.4 представлена зависимость дополнительной пористости ГЦПВБ композитов от дозировки СДО и соотношения Г : В.

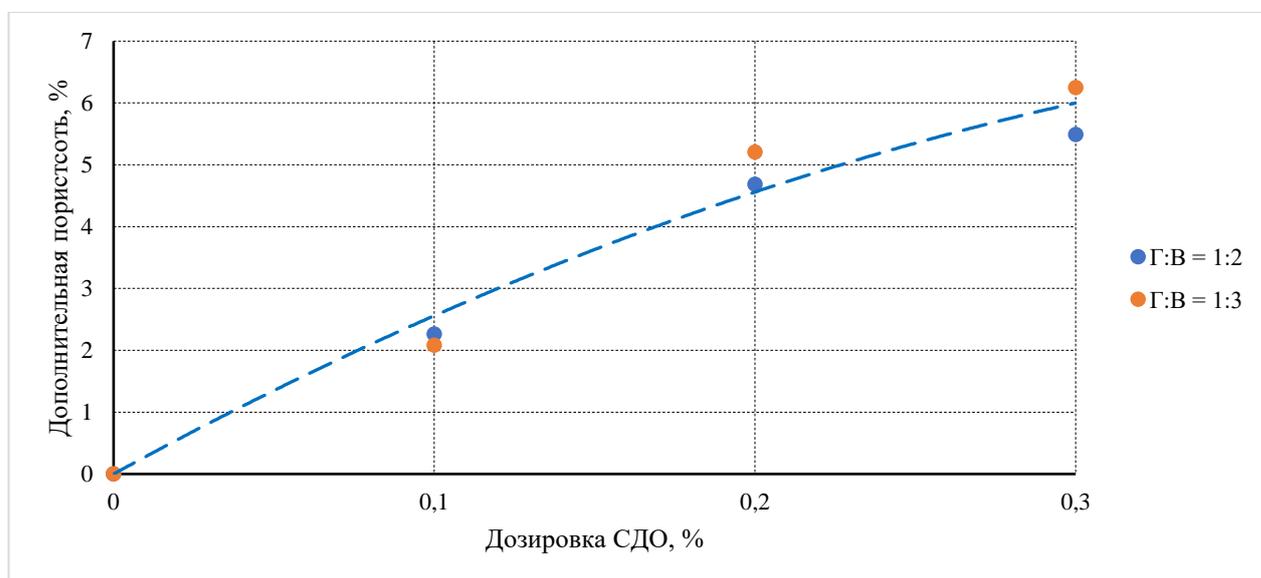


Рисунок 4.4 – Зависимость дополнительной пористости ГЦПВБ композитов от дозировки СДО

Дополнительная пористость ΔP определялась по формуле:

$$\Delta P = 100 \left(1 - \frac{\rho_{\text{СДО}}}{\rho_{\text{Э}}} \right), \% \quad (4.5)$$

где $\rho_{\text{СДО}}$, $\rho_{\text{Э}}$ – соответственно средняя плотность составов с СДО и бездобавочного эталона.

Зависимость дополнительной пористости ГЦПВБ композитов (воздуховлечение) от дозировки СДО (D) описывается уравнением:

$$\Delta P = 28,4(D) - 28(D)^2 \quad (4.6)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,97$, из чего следует, что:

- величина воздухововлечения в исследованном диапазоне дозировки СДО составляет от 2,3 до 3,1 % вовлеченного воздуха на 0,1 % СДО при дозировке СДО до 0,2 % и от 0,8 до 1 % при дозировке СДО 0,3 %;
- соотношение $\Gamma : В$ мало влияет на величину воздухововлечения.

На рисунке 4.5 представлена зависимость относительного предела прочности при сжатии $R_{\text{СДО}}/R_{\text{Э}}$ от дополнительной пористости в возрасте 2 ч и 28 сут.

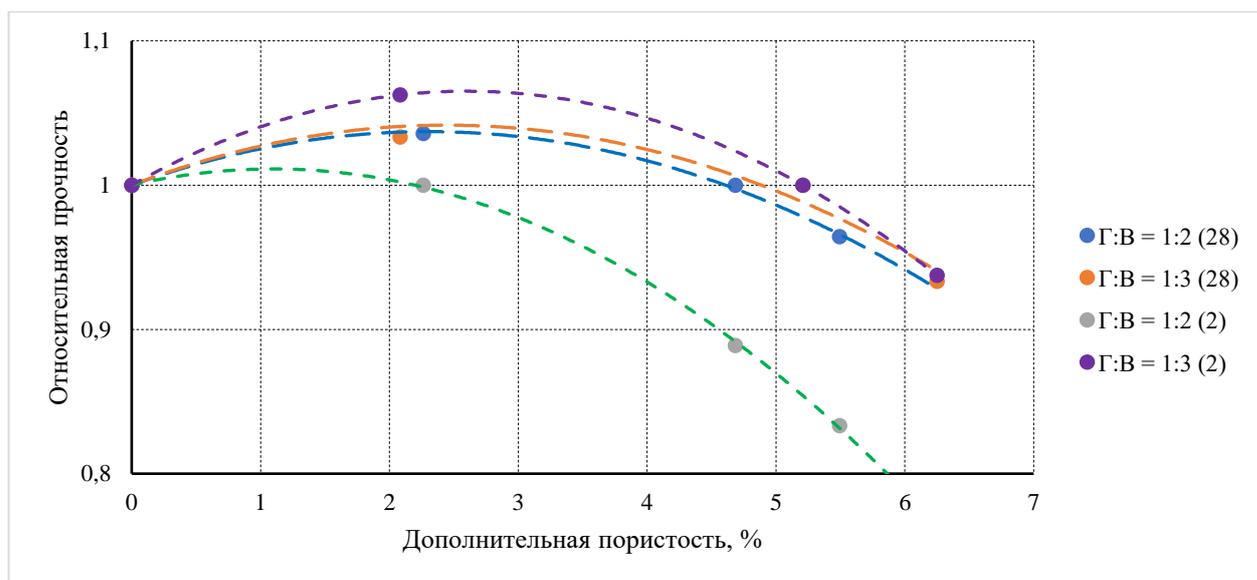


Рисунок 4.5 – Зависимость предела прочности при сжатии R от дополнительной пористости

(2), (28) – соответственно через 2 ч и 28 сут твердения; $\Gamma : В$ – гипс: вермикулит

Относительный предел прочности $R_{\text{СДО}}/R_{\text{Э}}$ при сжатии нелинейно зависит от дополнительной пористости ΔP , %:

$$\frac{R_{\text{СДО}}}{R_3} = 1 + a \cdot \Delta P + b \cdot \Delta P^2, \quad (4.7)$$

параметры уравнения ф. (4.7) представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Параметры уравнения ф. (4.7)

Г : В	Параметры уравнения ф.(4.6) в возрасте					
	2 ч			28 сут		
	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²
1:2	0,02	-0,009	0,99	0,032	-0,007	0,99
1:3	0,05	-0,001	1,0	0,034	-0,007	0,95

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- эффективность добавки СДО при дозировке до 0,2 % составляет от 2,3 до 3,1 % вовлеченного воздуха на 0,1 % СДО, далее с повышением дозировки до 0,3 % снижается до 0,8–1 %;

- практически независимо от соотношения Г : В дозировка СДО до 0,2 % не оказывает негативного влияния на предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут, а при дозировке СДО 0,3 % отмечается некоторое снижение прочности при сжатии, особенно при Г : В = 1 : 2, в связи с чем для рассматриваемых композитов применение СДО в дозировке более 0,2 % нецелесообразно.

На рисунке 4.6 представлено соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии ГЦПВ композитов при различных соотношениях Г : В после 2 ч и 28 сут твердения.

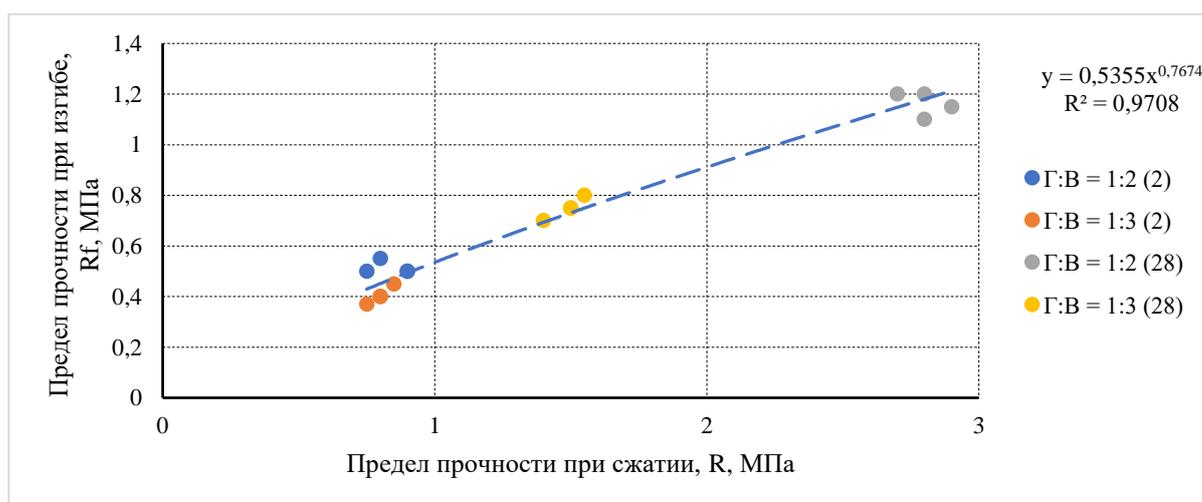


Рисунок 4.6 – Зависимость предела прочности при изгибе от предела прочности при сжатии

(2), (28) – соответственно через 2 ч и 28 сут; Г : В – гипс : вермикулит

Зависимость $R_f = f(R)$ ГЦПВ композитов практически независимо от $\Gamma : B$ и сроков твердения описывается уравнением:

$$R_f = 0,536R^{0,767} \quad (4.8)$$

с показателем достоверности аппроксимации $R^2 = 0,97$.

Строительные композиты на ГЦП вяжущем, наряду с определенными достоинствами, характеризуются повышенной хрупкостью и относительно невысокими прочностными показателями как при сжатии, так и при растяжении. На основе анализа, представленного в главе 1 обзора, формулируется гипотеза, что эффективным способом повышения указанных характеристик, особенно прочности при изгибе, является применения дисперсного армирования.

Состав ГЦПВ матрицы при соотношении $\Gamma : B = 1 : 3$ приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Состав и свойства ГЦПВ матрицы

Ц, % от Г (по массе)	П, % от Ц (по массе)	Дози- ровка СДО, % от Г+П+Ц (по массе)	Свойства ГЦПВ матрицы				
			ρ , в 28 сут, кг/м ³	R_f (МПа) в возрасте		R (МПа) в возрасте	
				2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	2	3	4	5	6	7	8
20	30	0,2	455	0,4	0,75	0,8	1,5

Параметры дисперсного армирования, а именно процент армирования по объему μ_v , % и отношение длины фибры к ее диаметру l/d изменялись соответственно от 0,3 до 0,9 % и от 667 до 2221. Исследовалось влияние указанных параметров на пределы прочности при сжатии и при изгибе в различные сроки твердения.

Результаты исследований свойств, армированных ГЦПВ композитов через 2 часа после схватывания смеси представлены в таблицах 4.7 и 4.8, а после 28 сут твердения представлены в таблицах 4.9 и 4.10.

Таблица 4.7 – Предел прочности при сжатии через 2 ч

№	μ, %	l/d	Единичные результаты функции выхода R, МПа						Сред. знач. R, МПа
			R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
1	0,30	1444	0,99	0,92	0,85	0,89	0,93	0,93	0,92
2	0,90	1444	0,72	0,85	0,83	0,78	0,95	0,82	0,83
3	0,75	2221	0,59	0,77	0,69	0,80	0,79	0,66	0,72
4	0,75	667	0,60	0,68	0,79	0,62	0,76	0,68	0,69
5	0,45	2221	0,75	0,74	0,82	0,86	0,87	0,67	0,79
6	0,45	667	0,76	0,69	0,91	0,87	0,76	0,87	0,81
7	0,60	1444	0,95	1,03	0,83	1,08	0,87	0,91	0,94

Таблица 4.8 – Предел прочности при изгибе через 2 ч

№	μ, %	l/d	Единичные результаты функции выхода R _f , МПа						Сред. знач. R _f , МПа
			R _{f,1}	R _{f,2}	R _{f,3}	R _{f,4}	R _{f,5}	R _{f,6}	
1	0,30	1444	0,29	0,38	0,51	0,47	0,38	0,40	0,40
2	0,90	1444	0,58	0,52	0,70	0,62	0,71	0,60	0,63
3	0,75	2221	0,40	0,42	0,49	0,50	0,46	0,40	0,46
4	0,75	667	0,41	0,49	0,40	0,46	0,40	0,51	0,45
5	0,45	2221	0,49	0,55	0,41	0,60	0,60	0,43	0,53
6	0,45	667	0,59	0,51	0,56	0,60	0,47	0,42	0,53
7	0,60	1444	0,57	0,61	0,69	0,69	0,68	0,58	0,65

Таблица 4.9 – Предел прочности при сжатии через 28 сут

№	μ, %	l/d	Единичные результаты функции выхода R, МПа						Сред. знач. R, МПа
			R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅	R ₆	
1	0,30	1444	1,58	1,63	1,68	1,75	1,80	1,71	1,70
2	0,90	1444	1,49	1,50	1,41	1,43	1,59	1,48	1,49
3	0,75	2221	1,28	1,24	1,41	1,20	1,29	1,35	1,31
4	0,75	667	1,35	1,27	1,21	1,31	1,23	1,29	1,29
5	0,45	2221	1,49	1,40	1,40	1,41	1,55	1,45	1,46
6	0,45	667	1,39	1,50	1,56	1,58	1,40	1,41	1,48
7	0,60	1444	1,78	1,69	1,79	1,76	1,69	1,75	1,76

Таблица 4.10 – Предел прочности при изгибе через 28 сут

№	μ, %	l/d	Единичные результаты функции выхода R _f , МПа						Сред. знач. R _f , МПа
			R _{f,1}	R _{f,2}	R _{f,3}	R _{f,4}	R _{f,5}	R _{f,6}	
1	0,30	1444	0,84	0,98	0,87	1,08	1,02	0,98	0,96
2	0,90	1444	1,27	1,40	1,30	1,29	1,36	1,22	1,33
3	0,75	2221	0,89	0,93	1,06	0,90	0,91	0,94	0,96
4	0,75	667	0,86	0,89	0,98	1,07	1,04	0,85	0,95
5	0,45	2221	1,06	1,20	0,98	1,08	1,17	1,06	1,10
6	0,45	667	0,99	1,16	1,20	1,10	1,05	1,06	1,09
7	0,60	1444	1,38	1,37	1,27	1,38	1,45	1,34	1,37

Влияние параметров армирования на предел прочности при сжатии исследованных ГЦПВ композитов при соотношении Г : В = 1 : 3 после 2 ч и 28 сут твердения показано на рисунке 4.7.

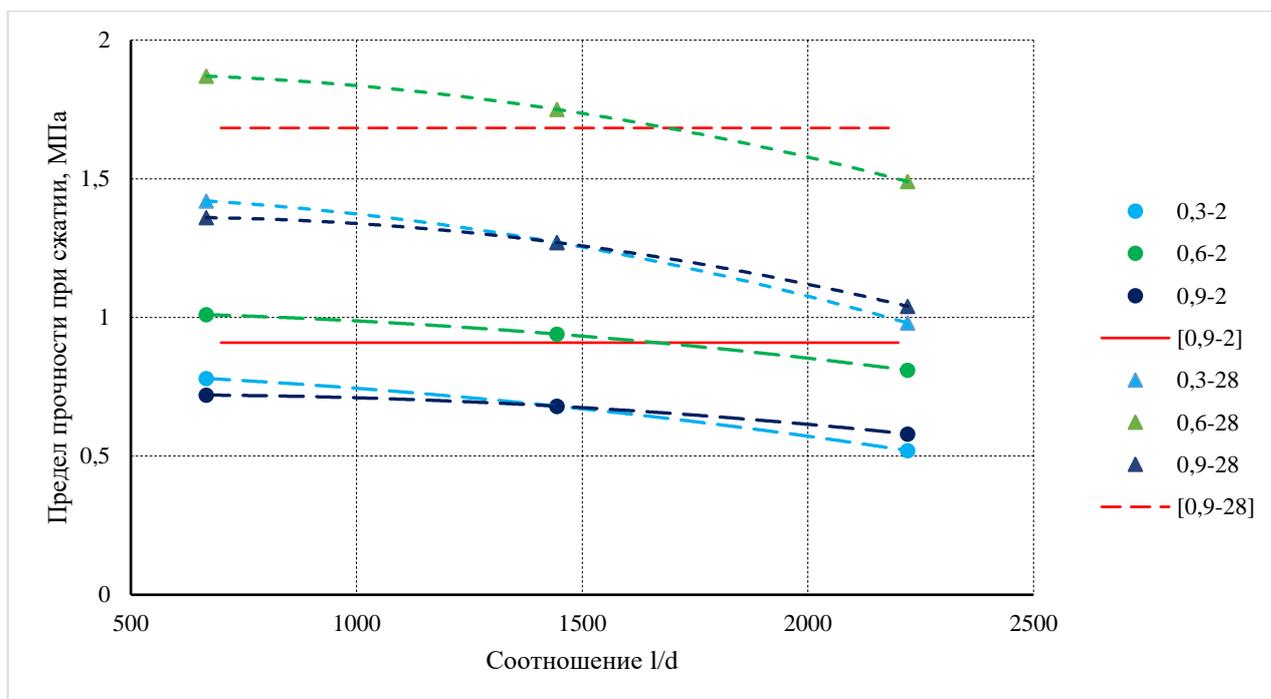


Рисунок 4.7 – Зависимость предела прочности при сжатии от соотношения l/d 0,3-0,9 – процент армирования по объему; 2 ч, 28 – время твердения 2ч и 28 сут; [0,9-2ч, 28] – уровень 90 % от максимума соответственно в возрасте 2 ч и 28 сут

Предел прочности при сжатии R (МПа) исследованных композитов нелинейно зависит от соотношения l/d:

$$R = a + b \frac{l}{d} + c \left(\frac{l}{d}\right)^2, \quad (4.9)$$

параметры уравнения ф. (4.9) представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Параметры уравнения ф. (4.9)

Процент армирования	Время твердения					
	2 ч			28 сут		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
0,3	0,82	$-2 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-8}$	1,44	$5 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-7}$
0,6	1,42	$1 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-8}$	1,86	$9 \cdot 10^{-5}$	$-1 \cdot 10^{-7}$
0,9	0,71	$5 \cdot 10^{-5}$	$-5 \cdot 10^{-8}$	1,33	$1 \cdot 10^{-4}$	$-1 \cdot 10^{-7}$

На рисунке 4.8 представлена зависимость предела прочности при изгибе исследованных ГЦПВ композитов в зависимости от параметров армирования при соотношении $\Gamma : B = 1 : 3$ после 2 ч и 28 сут твердения.

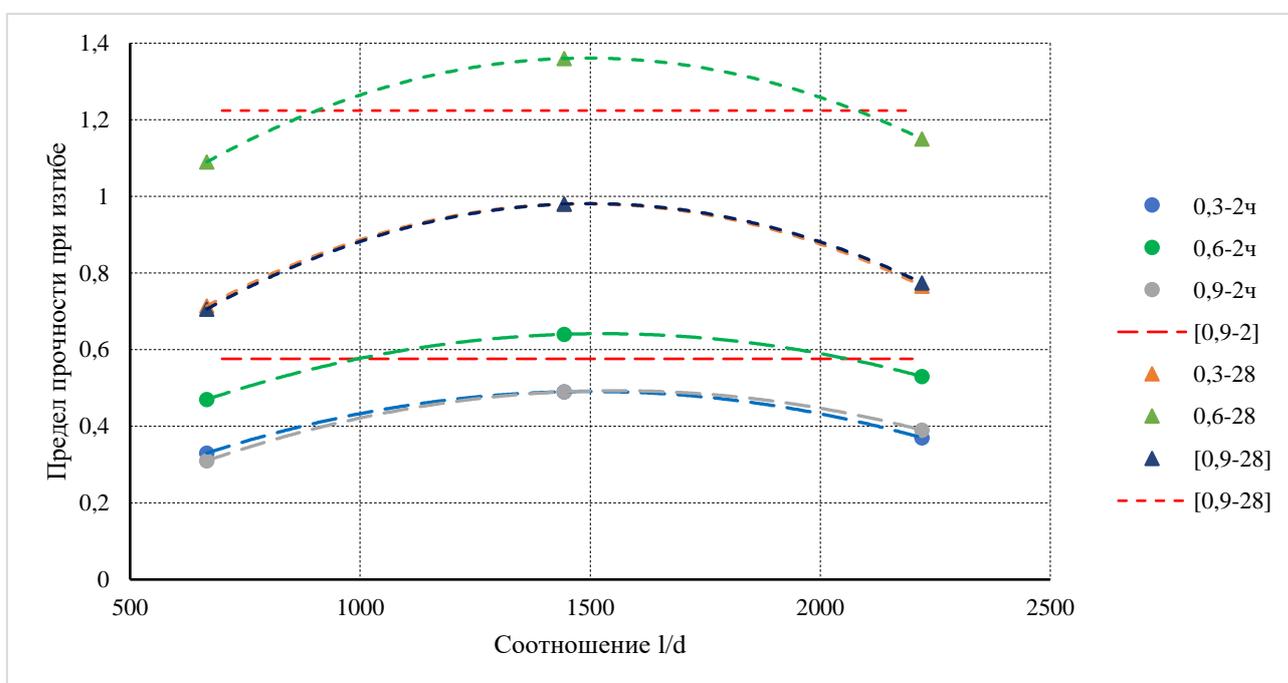


Рисунок 4.8 – Зависимость предела прочности при изгибе от величины l/d 0,3-0,9 – процент армирования по объему; 2ч, 28 – время твердения 2ч и 28 сут; [0,9-2ч, 28] – уровень 90 % от максимума соответственно в возрасте 2ч и 28 сут

Предел прочности при изгибе R_f (МПа) исследованных композитов нелинейно зависит от соотношения l/d :

$$R = a + b \frac{l}{d} + c \left(\frac{l}{d}\right)^2 \quad (4.10)$$

Параметры уравнения ф. (4.10) представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Параметры уравнения ф. (4.10)

Процент армирования	Время твердения					
	2 ч			28 сут		
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
0,3	-0,03	0,0007	$-2 \cdot 10^{-7}$	0,1	0,0012	$-4 \cdot 10^{-7}$
0,6	0,1	0,0007	$-2 \cdot 10^{-7}$	0,48	0,0012	$-4 \cdot 10^{-7}$
0,9	-0,07	0,0007	$-2 \cdot 10^{-7}$	0,09	0,0012	$-4 \cdot 10^{-7}$

Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и при сжатии R исследованных ГЦПВ композитов при соотношении $\Gamma : B = 1 : 3$ в возрасте 2 ч и 28 сут представлено на рисунке 4.9.

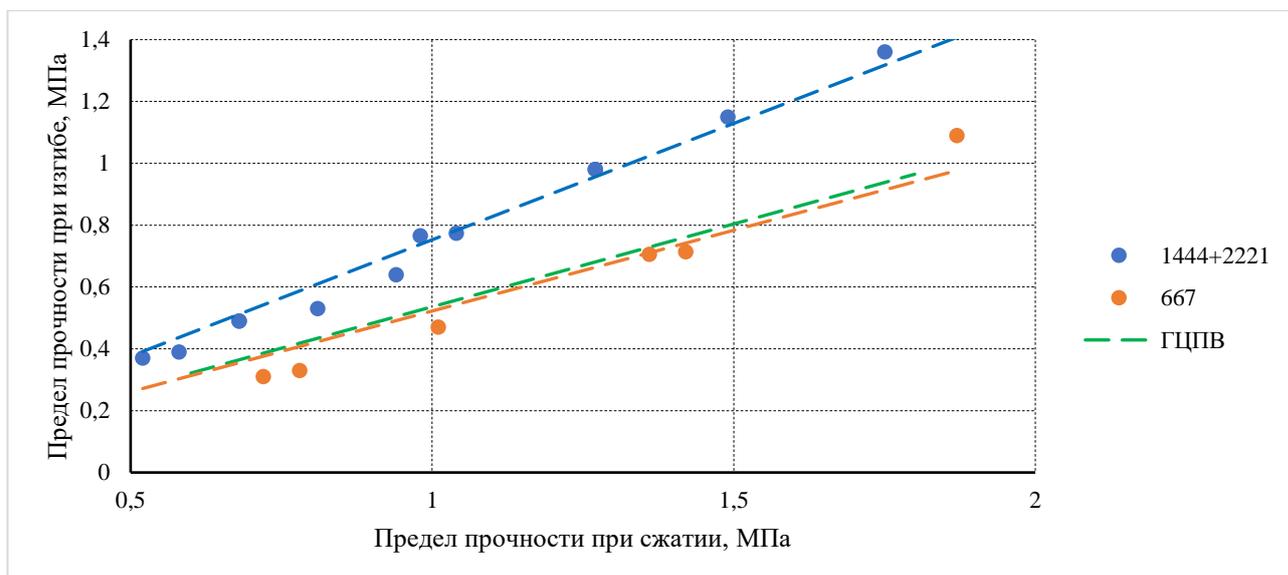


Рисунок 4.9 – Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии исследованных композитов

667; 1444; 2221 – отношение l/d ; ГЦПВ – неармированная матрица

Предел прочности при изгибе линейно зависит от предела прочности при сжатии:

$$R_f = kR, \quad (4.11)$$

в уравнении ф. (4.11) значения коэффициента k составляют соответственно 0,55 и 0,75 соответственно для значений l/d 0,667 и 1444 совместно с 2221, а показатель достоверности аппроксимации $R^2 = 0,99$ для всех случаев.

Анализ вышеприведенных результатов позволяет сделать следующие выводы:

- рациональным коэффициентом армирования является величина 0,6 % по объему, отклонение как в большую, так и в меньшую сторону приводит к снижению прочностных показателей независимо от сроков твердения;

- рациональное значение отношения l/d волокон, при котором обеспечивается не менее 90 % от максимальной прочности, составляет от 1000 до 1600;

- при соотношении $l/d = 667$ эффективность фибрового армирования практически равна 0.

В развитие исследований по оценке влияния параметров армирования на свойства изучаемых бетонов на основе многокомпонентных вяжущих произведено сравнение эффективности применения в качестве дисперсного армирования ГЦПВБ матрицы комбинированного армирования базальтовыми и полипропиленовыми волокнами, представленными полипропиленовой фиброй RS и базальтовыми волокнами, параметры которых представлены в главе 2.

Получение смесей для ГЦПВБ композитов с комбинированным армированием реализовано по различным схемам загрузки компонентов в зависимости от подвижности смеси и плана эксперимента. Использован смеситель принудительного действия. Введение компонентов осуществлялось в воду затворения. В случае одновременного введения нескольких компонентов предварительно осуществлялось их перемешивание всухую. На первом этапе исследований использовались литые смеси, при их перемешивании в воду затворения вводилась смесь Г+ПЦ+П+В (гипс + портландцемент + пепел + вермикулит) с базальтовыми и полипропиленовыми волокнами. Образцы для определения средней плотности и показателей прочности использовались 40х40х160 мм. Выдерживание осуществлялось в воздушно-сухих условиях. Испытания образцов выполнялись в соответствии с ГОСТ 23789–2018.

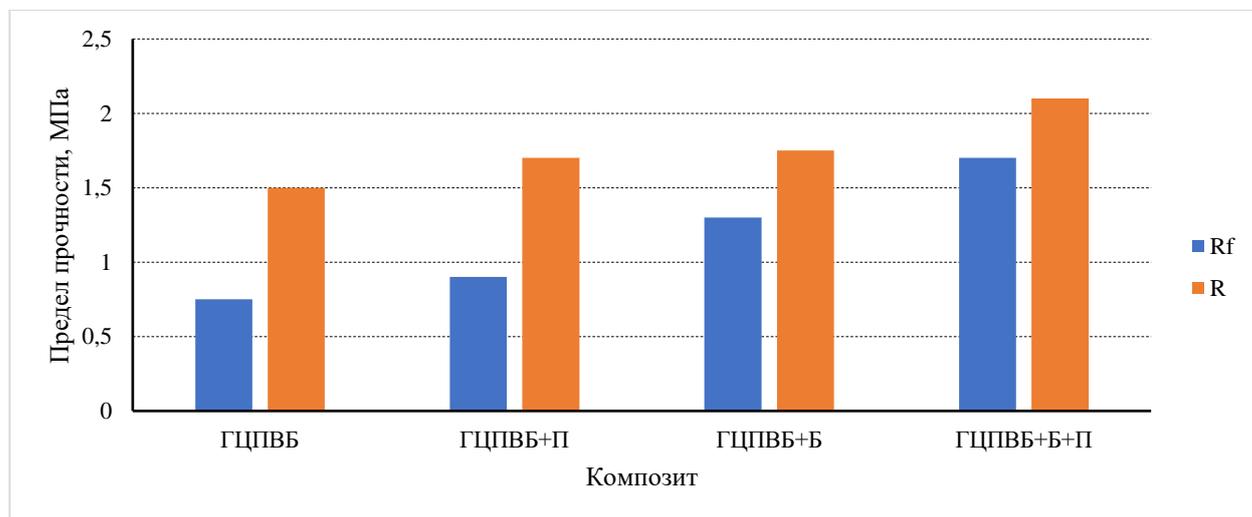
В таблице 4.13 представлены составы исследованных ФГЦПВБ смесей.

Таблица 4.13 – Составы и свойства ФГЦПВБ композитов

Со- ставы	Состав смеси, (% по массе)						Свойства бетона в возрасте 28 сут			
	Г	В	П	Ц	фибра		СДО	ρ - кг/м ³	R_f , (МПа)	R , (МПа)
					Б	ПП				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	40,1	45,83	3,3	10,7	–	–	0,07	480	0,75	1,5
2	40,1	45,33	3,0	10,0	1,5	–	0,07	480	1,3	1,75
3	40,1	46,35	3,0	10,0	–	0,48	0,07	480	0,9	1,7
4	40,1	44,85	3,0	10,0	1,5	0,48	0,07	480	1,7	2,1

Примечания: Г – гипс строительный; В – вермикулит; Ц – портландцемент; П – пепел; Б – базальтовая; ПП – полипропиленовая; ρ – средняя плотность; R_f – при изгибе; R – при сжатии

На рисунке 4.10 представлены результаты испытаний образцов на прочность в возрасте 28 сут составов № 1,2,3,4 по таблице 4.13 при следующих параметрах армирования: полипропиленовая фибра (П) 0,48 %; базальтовое волокно (Б) 1,5 %.



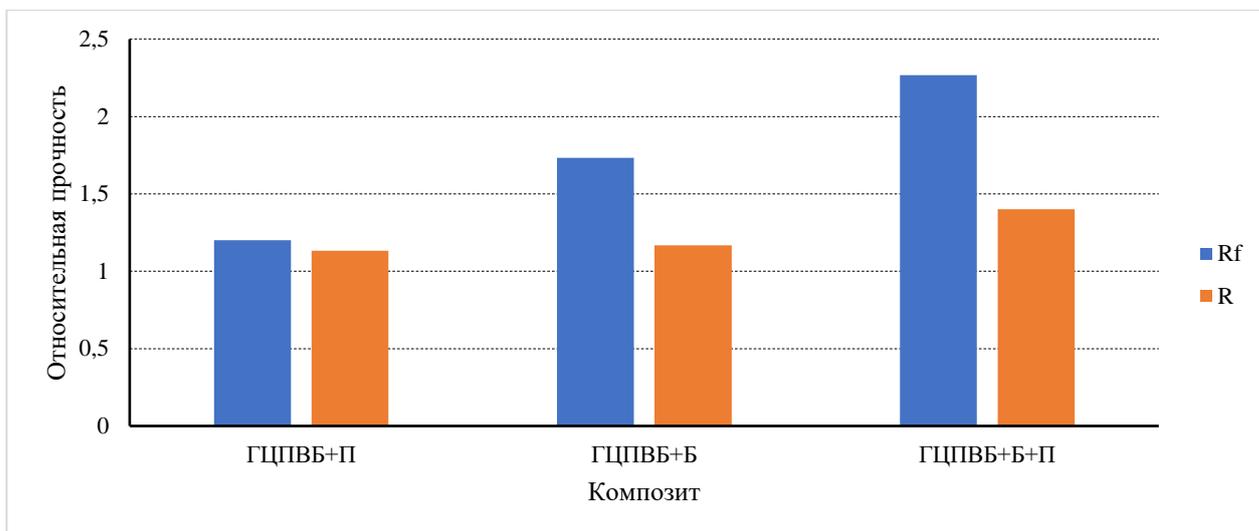


Рисунок 4.10 – Пределы прочности при изгибе и сжатии образцов различного состава в возрасте 28 сут

Вверху – абсолютные, внизу – относительно неармированного состава;

ГЦПВБ – гипс+пепел+цемент+вермикулит; П – полипропиленовые волокна;

Б – базальтовые волокна

Влияние вида дисперсной арматуры на соотношение пределов прочности $R_f = f(R)$ в различные сроки твердения ГЦПВБ композитов показано на рисунке 4.11.

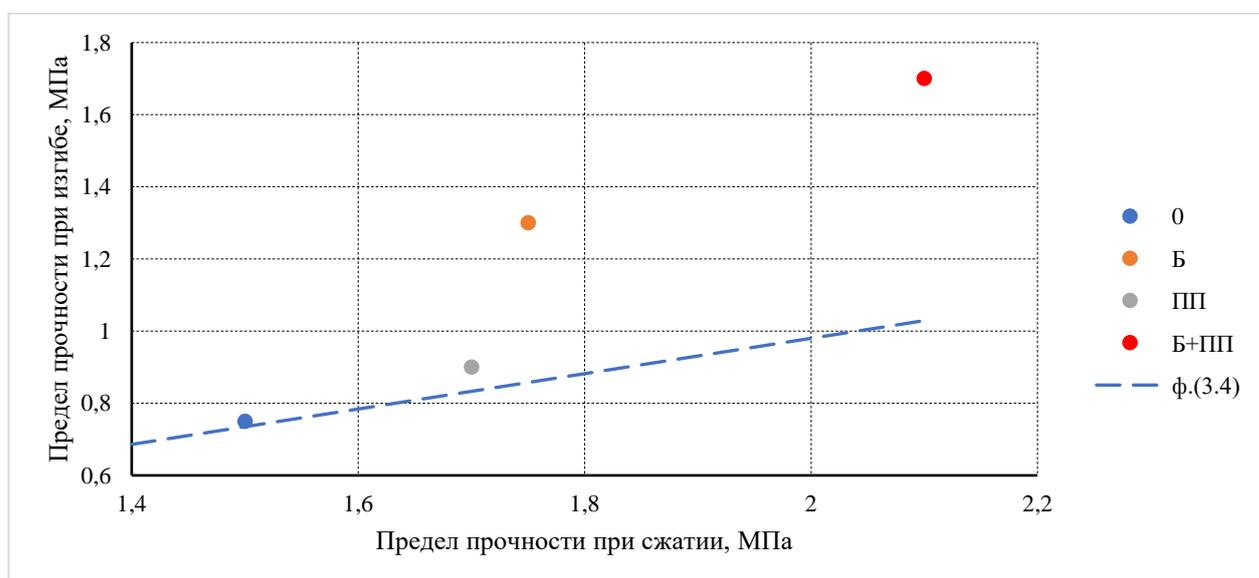


Рисунок 4.11 – Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R

0, Б, ПП, Б+ПП – соответственно без дисперсной арматуры, базальтовые волокна, полипропиленовая фибра, полидисперсное армирование композитов по таблице 4.13; f . (3.4)

– по уравнению f . (3.4)

Из представленных на рисунках 4.10 – 4.11 результатов очевидно, что:

- при армировании полипропиленовой фиброй предел прочности при сжатии возрастает до 13 %, при изгибе до 20 %, соотношение R_f/R при равной прочности на сжатие возрастает до 8 %, что свидетельствует о незначительном влиянии полипропиленовой фибры на прочностные свойства композитов;

- при армировании базальтовыми волокнами предел прочности при сжатии возрастает до 16 %, при изгибе до 73 %, соотношение R_f/R при равной прочности на сжатие возрастает до 51 %, что свидетельствует о значительном влиянии базальтовой фибры на предел прочности композитов при изгибе, при этом рост предела прочности при сжатии в принципе аналогичен при использовании полипропиленовой фибры, такое изменение прочностных показателей достаточно типично в случае армирования высокомодульными волокнами;

- при полидисперсном армировании предел прочности при сжатии возрастает до 40 %, при изгибе более чем в два (2,26) раза, соотношение R_f/R при равной прочности на сжатие возрастает до 65%, что свидетельствует о значительном влиянии полидисперсного фибрового армирования на прочностные свойства композитов при низкой прочности матрицы.

В качестве недостатков, представленных выше ФГЦПВБ можно указать высокая стоимость вспученного вермикулита, относительно низкие пределы прочности при сжатии и изгибе. Для снижения себестоимости и повышения уровня строительно-технических свойств композитов целесообразно использовать:

- комбинированное вяжущее Г + ПЦ + АМД (строительный гипс + ПЦ + вулканическая пемза фракции менее 0,16 мм);

- наполнитель ВВ + ВП (вспученный вермикулит фракции 0,63–5 мм + вулканическая пемза фракции 0,16 – 0,63 мм);

- дисперсное армирование базальтовыми волокнами и полидисперсное армирование;

- химическую добавку воздухововлекающую - смолу древесную омыленную (СДО).

В исследованиях использована вулканическая пемза Псыхурейского месторождения КБР с насыпной плотностью 700 кг/м³ фракции 0–0,63 мм.

Приготовление смеси выполнялось по двум схемам. Схема 1, двухстадийная - в воду затворения, содержащую добавку СДО, на первой стадии вводится предварительно всухую перемешанная смесь комбинированного вяжущего Г + ПЦ с вулканической пемзой и дисперсной арматурой, а на второй стадии вводится вспученный вермикулит. Схема 2, одностадийная – в воду затворения, содержащую добавку СДО, вводится предварительно всухую перемешанная смесь комбинированного вяжущего, дисперсной арматуры и заполнителей. Перемешивание всех компонентов продолжается 1,5 – 2 мин до получения однородной смеси.

В таблице 4.14. представлены данные о составах и основных строительно-технических свойствах фиброгипсоцементовермикулитопемзобетонной (ФГЦВПМБ) и фиброгипсоцементовермикулитопеплобетонной (ФГЦВПБ) смесей и композитов. В последней в качестве АМД использован вулканический пепел фракции 0-0,16 мм Заюковского месторождения КБР.

Таблица 4.14 – Составы и свойства ФГЦВПМБ и ФГЦВПБ композитов

№	Состав смеси, %							Свойства композита в возрасте 28 сут		
	Г ¹	В ¹	Пм ¹	П ¹	ПЦ ¹	БВ ²	СДО ¹	ρ, кг/м ³	R, МПа	R _f , МПа
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	48,3	35,8	–	3,6	12,2	–	0,1	619	2,8	1,3
2	47,7	35,4	–	3,5	12,1	1,2	0,1	625	3,3	2,26
3	40,1	45,83	–	3,3	10,7	–	0,07	480	1,5	0,75
4	40,1	45,33	–	3,0	10,0	1,5	0,07	480	1,75	1,3
5	40,1	45,33	–	3,0	10,0	1,5	0,07	480	1,75	1,3
6	40,0	45,33	–	3,1	10,0	1,5	0,07	480	1,75	1,3
7	48,3	15,76	23,64	–	12,2	–	0,1	695	3,7	2,3
8	47,7	15,56	23,34	–	12,1	1,2	0,1	705	4,4	3,6
9	40,1	19,65	29,57	–	10,7	–	0,07	590	3,2	2,1
10	40,1	19,33	29,00	–	10,0	1,5	0,07	590	3,6	3,3
11	40,1	19,33	29,00	–	10,0	1,5	0,07	590	3,6	3,3
12	40,0	19,33	29,10	–	10,0	1,5	0,07	590	3,6	3,3

Примечания: 1 – % по массе; 2 – % по объему; Г – гипс строительный; В – вермикулит; П – пепел; ПЦ – портландцемент; БВ – базальтовые волокна; СДО – воздухововлекающая добавка; ρ – средняя плотность; R_f – при изгибе; R – при сжатии

Предел прочности при сжатии R исследованных композитов по таблице 4.14 зависит от средней плотности, вида АМД и параметров армирования (рисунок 4.12).

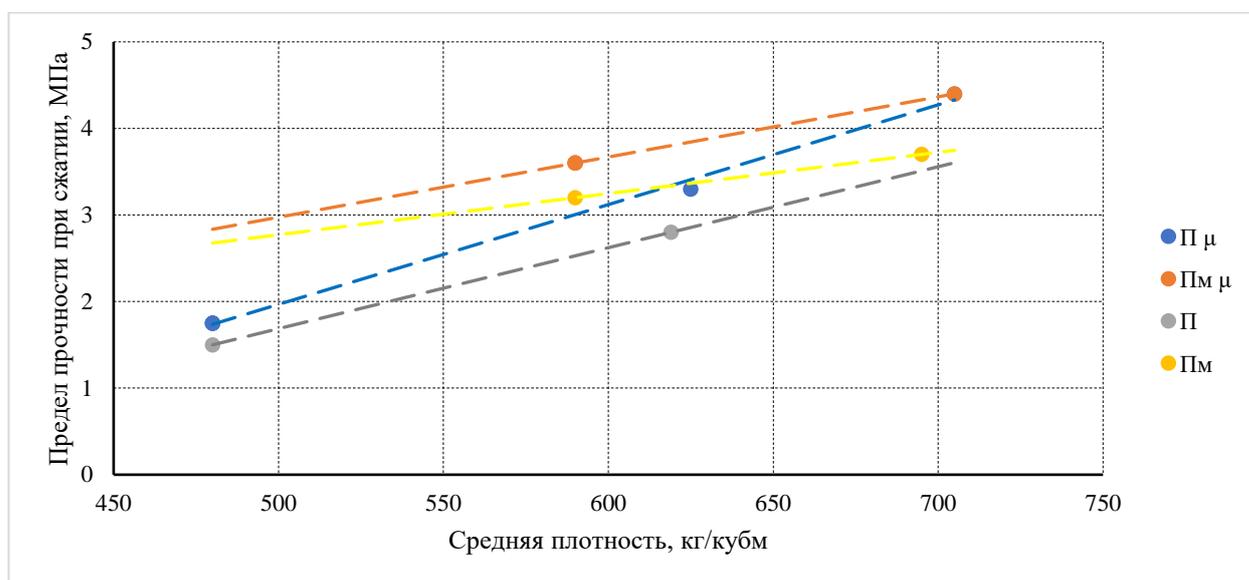


Рисунок 4.12 – Влияние рецептурных факторов на предел прочности при сжатии исследованных композитов

П, ПМ – соответственно АМД пепел и пемза; μ – с базальтовыми волокнами

Предел прочности при сжатии R в возрасте 28 сут исследованных композитов линейно зависит от средней плотности:

$$R = a + b\rho \quad (4.13)$$

параметры уравнения ф. (4.13) представлены в табл. 4.15.

Таблица 4.15 – Параметры уравнения ф. (4.13).

Коэффициенты	Композиты			
	ПМ μ	П μ	ПМ	П
a	- 0,5	- 3,79	0,39	- 2,99
b	0,007	0,0115	0,0048	0,0094

Примечание: показатель достоверности аппроксимации всех уравнений $R^2 = 1$

Анализ выше представленных результатов показывает, что в содержащих пемзу составах превышение предела прочности при сжатии относительно составов с пеплом при наличии дисперсного армирования составляет 1,15 раза при

плотности 620 кг/м³ и 1,73 раза при плотности при плотности 470 кг/м³, при отсутствии дисперсного армирования соответственно 1,19 раза при плотности 620 кг/м³ и 1,85 раза при плотности при плотности 470 кг/м³.

На рисунке 4.13 представлено соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R исследованных композитов по таблице 4.14 в зависимости от параметров дисперсного армирования.

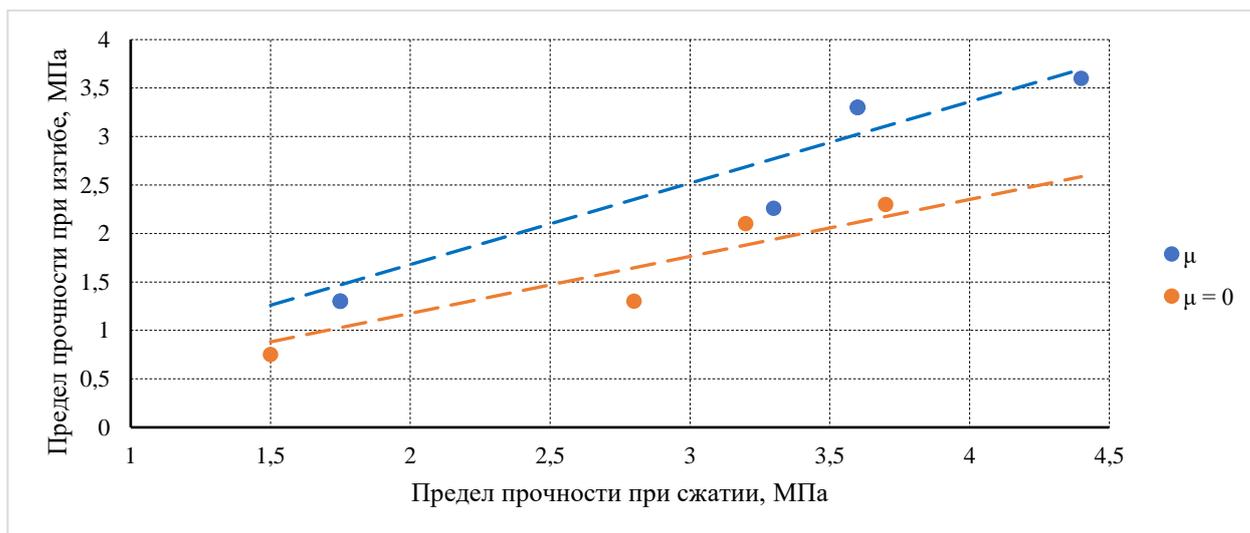


Рисунок 4.13 – Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R исследованных композитов

μ – с дисперсным армированием; $\mu = 0$ – без дисперсного армирования

Зависимость предела прочности при изгибе R_f исследованных композитов по таблице 4.14 от предела прочности при сжатии R описывается уравнением:

$$R_f = kR, \quad (4.14)$$

параметры которого представлены в таблице 4.16.

Таблица 4.16 – Параметры уравнения ф. (4.14)

Параметры уравнения	Параметры армирования	
	μ	$\mu = 0$
k	0,84	0,59
R^2 *	0,99	0,98

Примечание: * – показатель достоверности аппроксимации

Анализ полученных результатов показывает, что дисперсное армирование при равной прочности при сжатии повышает предел прочности при изгибе в 1,42 раза, при этом вид АМД на соотношение R_f/R влияет незначительно.

Более высокие показатели в случае использования в составе композита пемзы взамен пепла связано с тем, что использование пемзы фракции 0–0,63 мм, выполняющей роль и АМД и заполнителя, вместо вулканического пепла фракции 0–0,16 мм и вспученного вермикулита фракции 0,16–0,63 мм повышает в комбинированном вяжущем содержание АМД. Себестоимость разработанного огнезащитного композита с применением пемзы существенно ниже себестоимости ранее рассмотренных аналогов вследствие замены дорогостоящего вспученного вермикулита вулканической пемзой.

4.2. Огнезащитные свойства фиброгипсоцементновермикулитобетонных композитов с вулканическим пеплом и пемзой

Армоцементные конструкции имеют низкий предел огнестойкости [14], в связи с чем актуальной задачей является повышение огнезащитных свойств конструкций, например, посредством изготовления их с огнезащитным слоем. Исследования выполнены с использованием слоистых конструкций армоцемент 20 мм + огнезащитный слой 20 мм из фиброгипсоцементнопепловермикулитобетонного (ФГЦПВБ) либо фиброгипсоцементнопемзовермикулитобетонного (ФГЦПмВБ) композита. Формование армоцементного слоя реализовано по вибрационной технологии. Формование огнезащитного слоя реализовано с использованием литых ФГЦПВБ либо ФГЦПмВБ смесей. Выдерживание до испытаний осуществлялось в воздушно-сухих условиях.

Для проведения испытаний в условиях, моделирующих воздействие пожара, использованы двухслойные образцы 20+20 мм с размерами в плане 210x210 мм обеспечивающую температурный режим «стандартного» пожара, регламентированному ГОСТ 30247.1–94. Производилась оценка предела огнестойкости по несущей способности (R) слоистых армоцементных плит, которая определялась по времени прогрева до 300 °С армирующей сетки на границе несущего

и огнезащитного слоев. При испытаниях не зафиксировано разрушений двухслойных элементов. Влажности армоцементного и огнезащитного слоев к моменту испытаний составляли от 3 до 4 % и от 8 до 10 % соответственно.

На рисунке 4.14 представлена зависимость температуры на необогреваемой поверхности двухслойных армоцементных образцов от вида используемого в качестве огнезащитного слоя композита и его средней плотности.

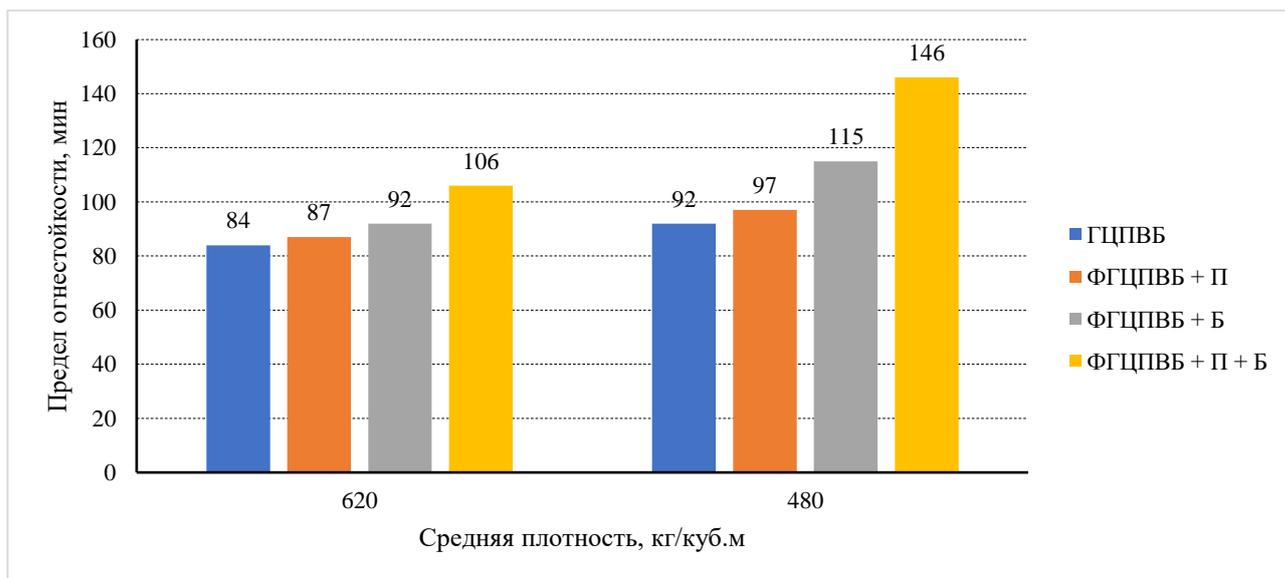


Рисунок 4.14 – Зависимость температуры на необогреваемой поверхности двухслойных армоцементных образцов от вида композита и его средней плотности
 1, 5, – ГЦПВБ композит; 2, 6 – ФГЦПВБ композит с полипропиленовыми волокнами; 3, 7 – ФГЦПВБ композит с базальтовыми волокнами; 4, 8 – ФГЦПВБ композит с базальтовыми и полипропиленовыми волокнами

Введение полипропиленовых волокон в ФГЦПВБ смесь не оказывает заметного влияния на прочностные свойства композита. При введении базальтовых волокон отмечено повышение предела прочности при сжатии ФГЦПВБ композита в 1,17 раза, при изгибе – в 1,73 раза относительно ГЦПВБ композита. Полидисперсное армирование базальтовыми и полипропиленовыми волокнами композита позволило относительно композитов на базальтовых волокнах повысить предел прочности при сжатии более чем в 1,2 раза, при изгибе в 1,3 раза.

Полидисперсное армирование базальтовыми и полипропиленовыми волокнами ФГЦПВБ композита существенно повысило огнезащитные свойства относительно композитов только с базальтовыми или только с полипропиленовыми волокнами. Это обусловлено способностью базальтовых волокон обеспечивают сохранность скелета композита при высоких температурах, тогда как полипропиленовые волокна начинают выгорать при температуре порядка 160–168 °С, при этом образуются дополнительные воздушные поры, что снижает температуропроводность композита и повышает его огнезащитные свойства.

Численные методы расчета предела огнестойкости обеспечивают достаточное для практических целей совпадение расчетных и экспериментальных значений [175, 176] и позволяют посредством решения обратной задачи получить по результатам вышеописанных экспериментальных исследований пределов огнестойкости слоистых конструкций получить необходимые для расчетов температурных полей зависимости изменения коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости. Использован метод конечных разностей, широко применяемый в различных областях науки и техники [38, 177]. В общем виде зависимости представлены уравнениями:

$$\lambda_g(t) = \lambda_1 + k_1 t, \quad c_g(t) = c_1 + k_2 t, \quad \lambda_a(t) = \lambda_2 + k_3 t, \quad c_a(t) = c_2 + k_4 t,$$

$$\alpha_g(t) = 29 + \frac{5,77 \varepsilon_g}{t(0, \tau) - T_n} \left[\left(\frac{T_n + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t(0, \tau) + 273}{100} \right)^4 \right], \quad (4.15)$$

$$\alpha_a = 1,5 \sqrt{t(l, \tau) - T_c} + \frac{5,77 \varepsilon_a}{t(l, \tau) - T_c} \left[\left(\frac{t(l, \tau) + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_c + 273}{100} \right)^4 \right],$$

где $\lambda_1, \lambda_2, c_1, c_2$ – начальные значения коэффициентов теплопроводности и теплоемкости соответственно огнезащитного и несущего слоев; k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, определяемые из условия удовлетворительного совпадения экспериментальных и расчетных кривых прогрева плит; $\varepsilon_g, \varepsilon_a$ – степени черноты соответственно огнезащитного и несущего слоев. Использован метод конечных разностей, в т.ч. конечноразностная неявная двухслойная схема вычислений [38, 177]

с заменой входящих в уравнение теплопроводности и граничные условия производных на известные разностные соотношения. Далее методами прогонки и итерации производится решение системы алгебраических уравнений с трехдиагональной матрицей коэффициентов на каждом верхнем слое по времени.

В таблице 4.17 представлены полученные посредством решения обратной задачи по полученным экспериментальным результатам зависимости коэффициентов λ теплопроводности (Вт/м·°К) и C теплоемкости (Дж/кг·°К) разработанных ГЦПВБ и ФГЦПВБ композитов.

Таблица 4.17 – Уравнения $\lambda (C) = f(t)$ ГЦПВБ и ФГЦПВБ композитов

№	Слой	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·°К	C , Дж/кг·°К
	Несущий	2300	$\lambda_a(t) = 0,83 - 0,0004t$	$c_a(t) = 770 + 0,8t$
1	ГЦПВБ композит	620	$\lambda_o(t) = 0,102 + 0,00005t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
2	ФГЦПВБ + ПП композит	620	$\lambda_o(t) = 0,101 + 0,000045t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
3	ФГЦПВБ + Б композит	620	$\lambda_o(t) = 0,103 + 0,00004t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
4	ФГЦПВБ +ПП + Б композит	620	$\lambda_o(t) = 0,102 + 0,00003t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
5	ГЦПВБ композит	480	$\lambda_o(t) = 0,087 + 0,00006t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
6	ФГЦПВБ + ПП композит	480	$\lambda_o(t) = 0,087 + 0,00006t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
7	ФГЦПВБ + Б композит	480	$\lambda_o(t) = 0,088 + 0,00005t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
8	ФГЦПВБ +ПП + Б композит	480	$\lambda_o(t) = 0,088 + 0,00003t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$

Примечания: ρ – средняя плотность; λ – коэффициент теплопроводности; C – коэффициент теплоемкости; ПП – полипропиленовые волокна; Б – базальтовые волокна

На рисунке 4.15 представлена зависимость предела огнестойкости исследованных слоистых макетов конструкций от толщины и состава огнезащитного слоя.

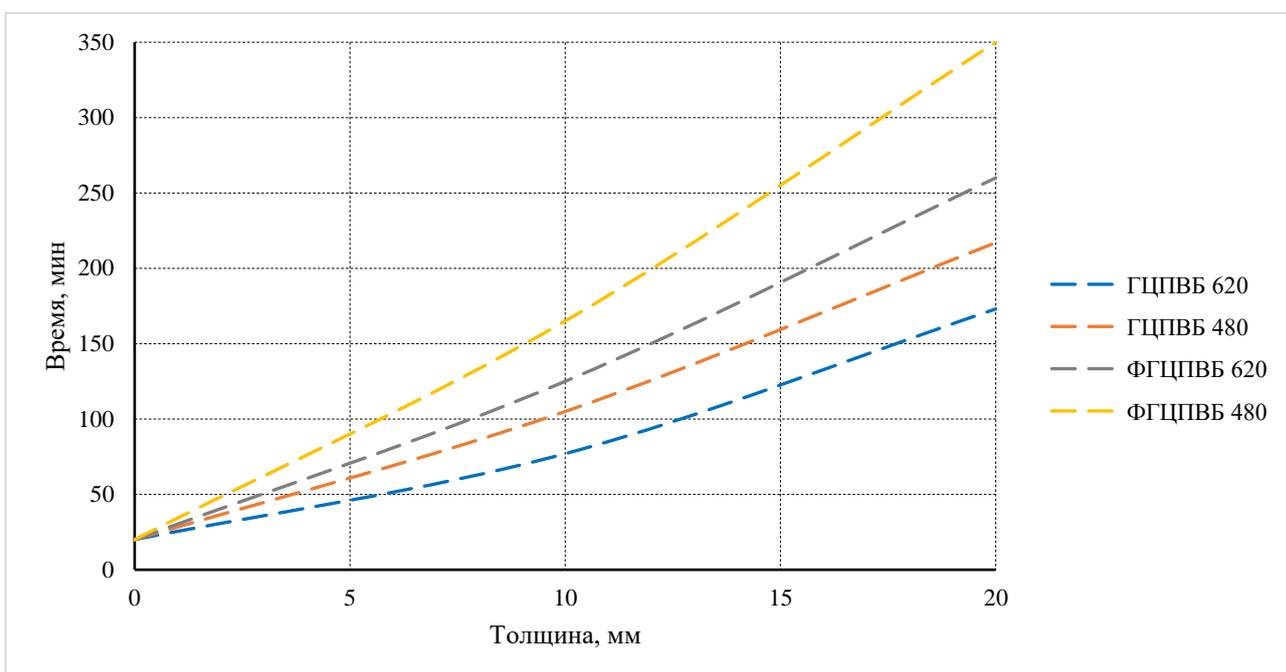
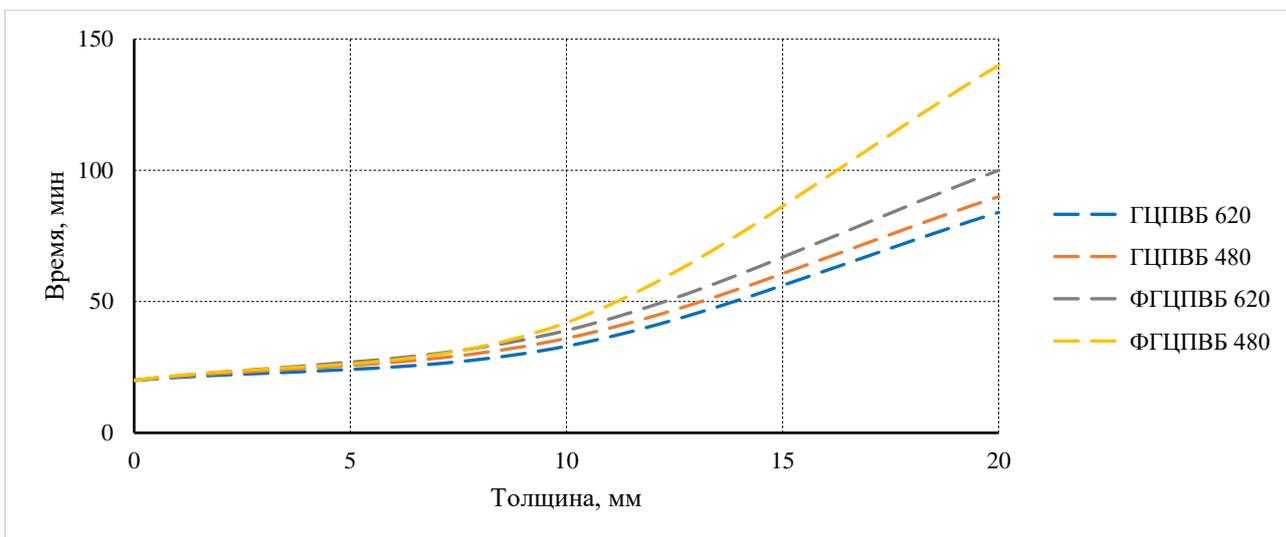


Рисунок 4.15 – Зависимость предела огнестойкости по критериям потери теплоизолирующей способности (вверху) и несущей способности (внизу) от толщины и состава огнезащитного слоя
(1, 4, 5, 8 – смотри таблицу 4.17, рисунок 4.14)

Предел огнестойкости $[\tau]$ исследованных двухслойных элементов с огнезащитным слоем из различных композитов нелинейно зависит от толщины огнезащитного слоя h :

$$[\tau] = 20 + ah + bh^2, \quad (4.16)$$

параметры уравнения ф. (4.16) представлены в таблице 4.18. Показатель достоверности аппроксимации во всех случаях $R^2 = 1$.

Таблица 4.18 – Параметры уравнения ф. (4.16)

Критерий огнестойкости	Параметры уравнения ф.(4.16)							
	ГЦПВБ				ФГЦПВБ			
	$\rho = 620$		$\rho = 480$		$\rho = 620$		$\rho = 480$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Предел прочности	3,75	0,195	7,15	0,135	9,0	0,15	12,5	0,2
Теплопроводность	- 0,6	0,19	- 0,3	0,19	- 0,2	0,21	- 1,6	0,38

На рисунке 4.16 представлена зависимость предела огнестойкости плит из ГЦПВБ и ФГЦПВБ композитов по критерию потери теплоизолирующей способности.

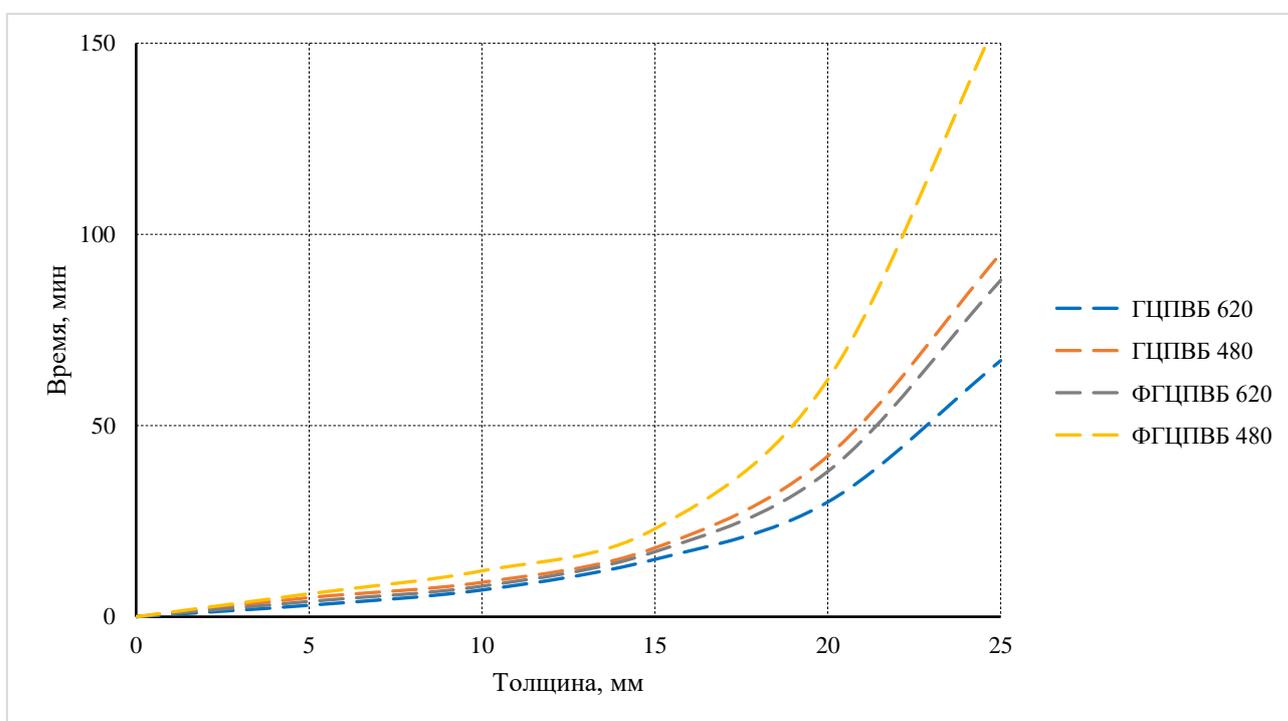


Рисунок 4.16 – Зависимость предела огнестойкости от толщины плит из ГЦПВБ и ФГЦПВБ композитов и их состава по критерию потери теплоизолирующей способности композита (1, 2, 3, 4 – смотри таблицу 4.17, рисунок 4.15)

Предел огнестойкости $[\tau]$ плит из ГЦПВБ и ФГЦПВБ композитов нелинейно зависит от толщины плиты h :

$$[\tau] = ah + bh^2, \quad (4.17)$$

Параметры уравнения ф. (4.17) представлены в таблице 4.19. Показатель достоверности аппроксимации во всех случаях $R^2 = 0,97$.

Таблица 4.19 – Параметры уравнения ф. (4.17)

Критерий огнестойкости	Параметры уравнения ф.(4.17)							
	ГЦПМВБ				ФГЦПМВБ			
	$\rho = 620$		$\rho = 480$		$\rho = 620$		$\rho = 480$	
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Теплопроводность	- 1,0	0,14	- 1,64	0,21	- 1,57	0,195	- 3,57	0,39

Экспериментальные результаты оценки огнестойкости слоистых вышеописанных образцов с огнезащитным слоем 20 мм из ГЦПМВБ и ФГЦПМВБ (Пм – пемза) композитов приведены на рисунке 4.17.

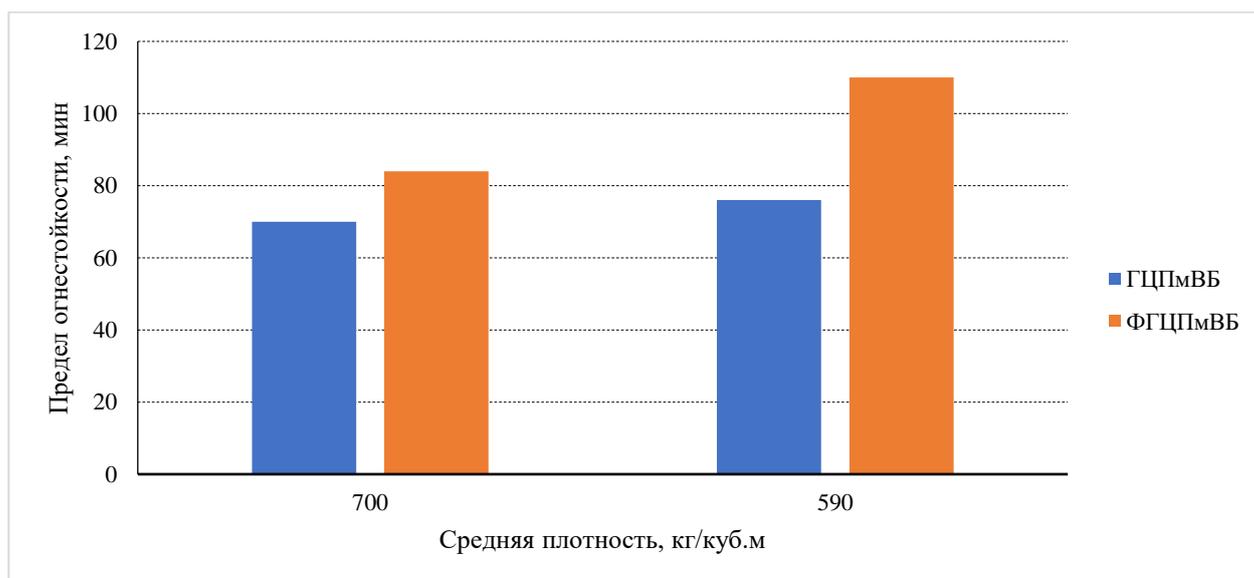


Рисунок 4.17 – Предел огнестойкости по критерию теплоизолирующей способности

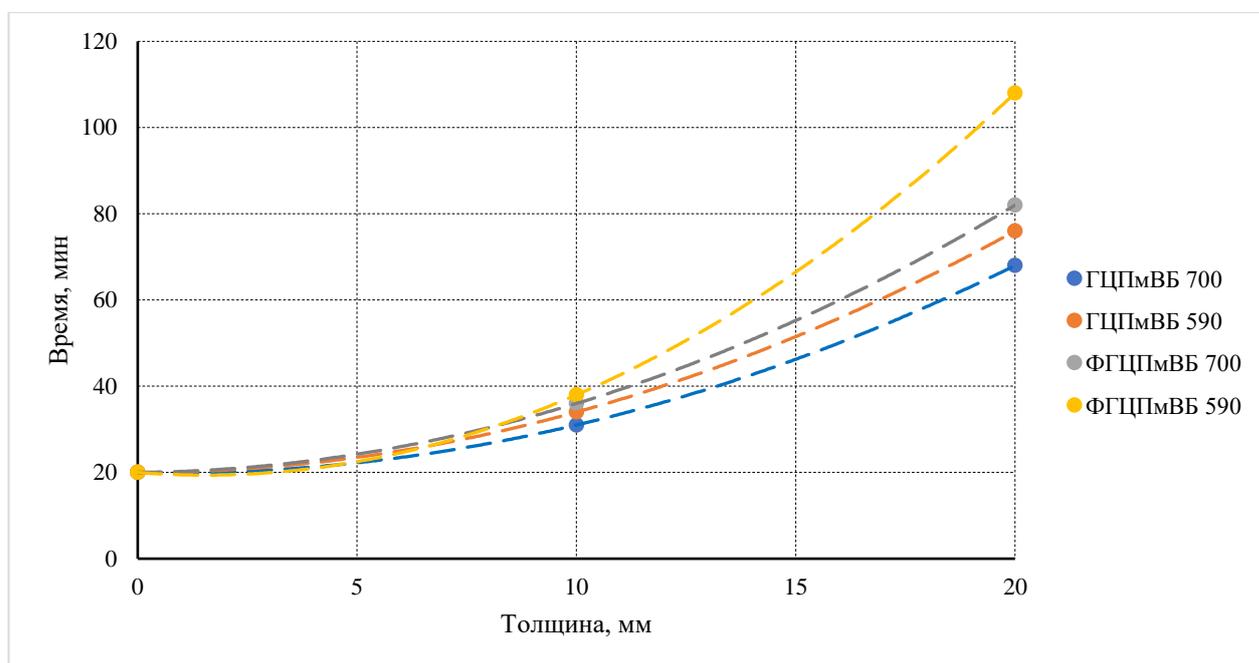
В таблице 4.20 представлены зависимости коэффициентов λ теплопроводности ($Вт/м \cdot ^\circ К$) и C теплоемкости ($Дж/кг \cdot ^\circ К$) разработанных ГЦПМВБ (Пм – пемза) и ФГЦПМВБ (Пм – пемза) композитов.

Таблица 4.20 – Уравнения $\lambda(C) = f(t)$ ГЦПМВБ и ФГЦПМВБ композитов

№ п/п	Слой	ρ , кг/м ³	λ , Вт/м·°К	C , Дж/кг·°К
	несущий	2300	$\lambda_a(t) = 0,83 - 0,0004t$	$c_a(t) = 770 + 0,8t$
1	ГЦПМВБ композит	700	$\lambda_o(t) = 0,115 + 0,00006t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
2	ФГЦПМВБ + Б композит	700	$\lambda_o(t) = 0,115 + 0,00004t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
3	ГЦПМВБ композит	590	$\lambda_o(t) = 0,104 + 0,00005t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$
4	ФГЦПМВБ + Б композит	590	$\lambda_o(t) = 0,105 + 0,00002t$	$c_o(t) = 748 + 0,63t$

Примечания: ρ – средняя плотность; λ – коэффициент теплопроводности; C – коэффициент теплоемкости; Б – базальтовые волокна

На рисунке 4.18 представлены результаты оценки предела огнестойкости плит из ГЦПМВБ и ФГЦПМВБ композитов по критериям потери теплоизолирующей и несущей способности.



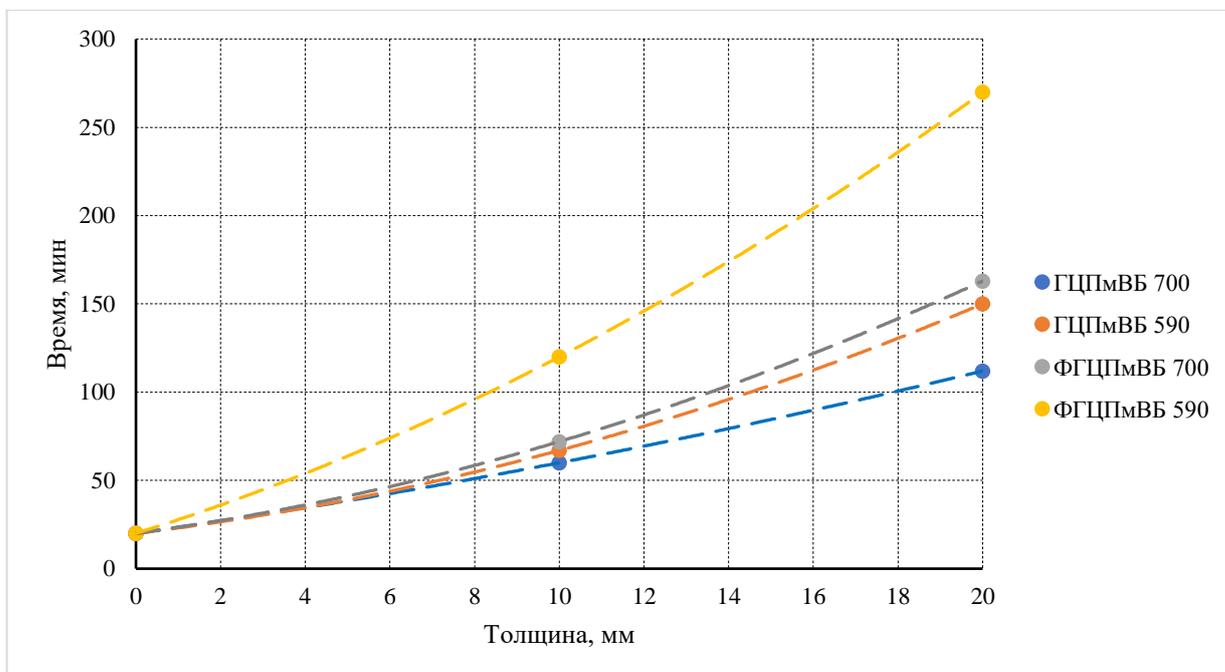


Рисунок 4.18 – Зависимость предела огнестойкости по критериям потери теплоизолирующей способности (вверху) и несущей способности (внизу) от средней плотности и состава огнезащитного слоя

1, 2, – ГЦПВБ, 3,4 – ФГЦПВБ композиты; 700, 590 – средняя плотность

Зависимость предела огнестойкости $[\tau]$ исследованных двухслойных элементов с различными композитами в качестве огнезащитного слоя толщиной h описывается уравнением:

$$[\tau] = 20 + ah + bh^2, \quad (4.18)$$

параметры которого представлены в таблице 4.21. Показатель достоверности аппроксимации во всех случаях $R^2 = 1$.

Таблица 4.21 – Параметры уравнения ф. (4.18)

Критерий огнестойкости	Параметры уравнения ф.(4.18)							
	ГЦПВБ				ФГЦПВБ			
	$\rho = 700$		$\rho = 590$		$\rho = 700$		$\rho = 590$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Предел прочности	3,4	0,06	2,9	0,18	3,25	0,195	7,5	0,25
Теплопроводность	- 0,2	0,13	$7 \cdot 10^{-15}$	0,14	0,1	0,15	- 0,8	0,26

На рисунке 4.19 представлены результаты оценки предела огнестойкости от толщины плит из ГЦПмВБ и ФГЦПмВБ композитов по критерию потери теплоизолирующей способности.

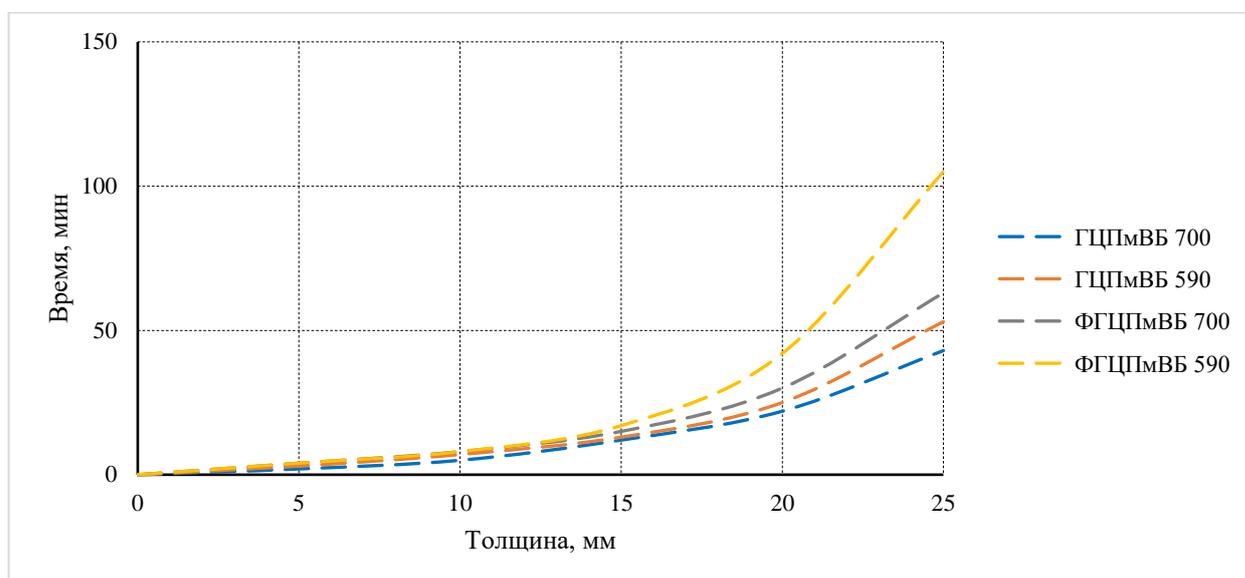


Рисунок 4.19 – Предел огнестойкости плит из ГЦПмВБ и ФГЦПмВБ композитов по критерию потери теплоизолирующей способности

Зависимость предела огнестойкости $[\tau]$, представленная на рисунке 4.19, от толщины плиты и вида композита h описывается уравнением:

$$[\tau] = ah + bh^2, \quad (4.19)$$

параметры которого представлены в таблице 4.22. Показатель достоверности аппроксимации во всех случаях $R^2 = 0,97$.

Таблица 4.22 – Параметры уравнения ф. (4.19)

Критерий огнестойкости	Параметры уравнения ф.(4.19)							
	ГЦПмВБ				ФГЦПмВБ			
	$\rho = 700$		$\rho = 590$		$\rho = 700$		$\rho = 590$	
	a	b	a	b	a	b	a	b
Теплопроводность	- 0,416	0,083	- 0,576	0,103	- 0,705	0,123	- 2,26	0,246

На рисунке 4.20 представлены обобщенные результаты оценки предела огнестойкости слоистых конструкций.

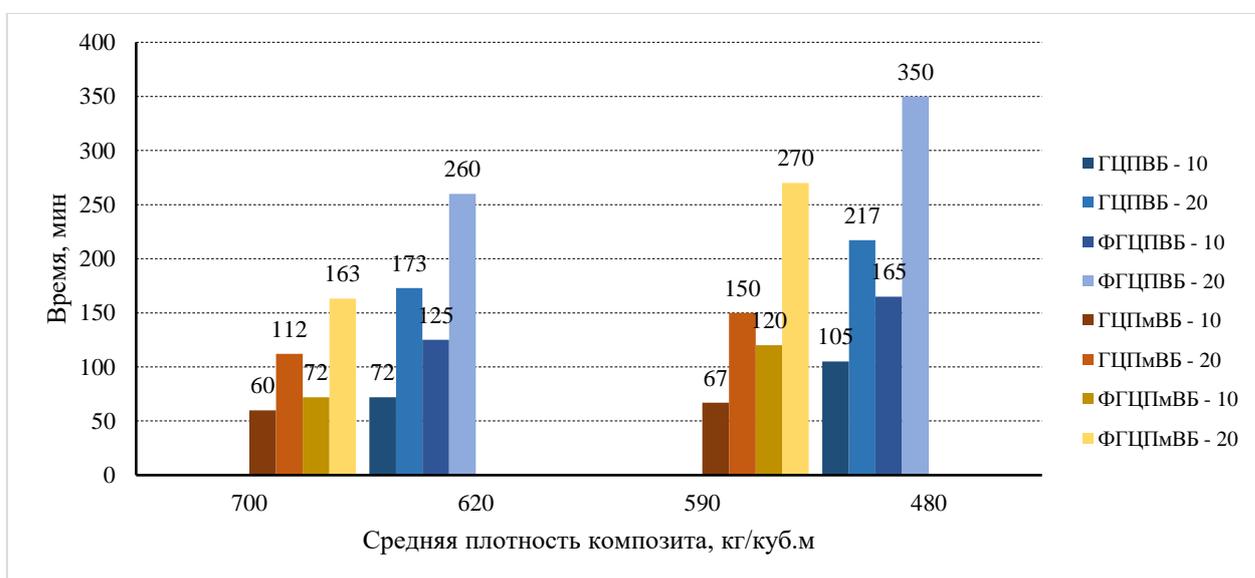
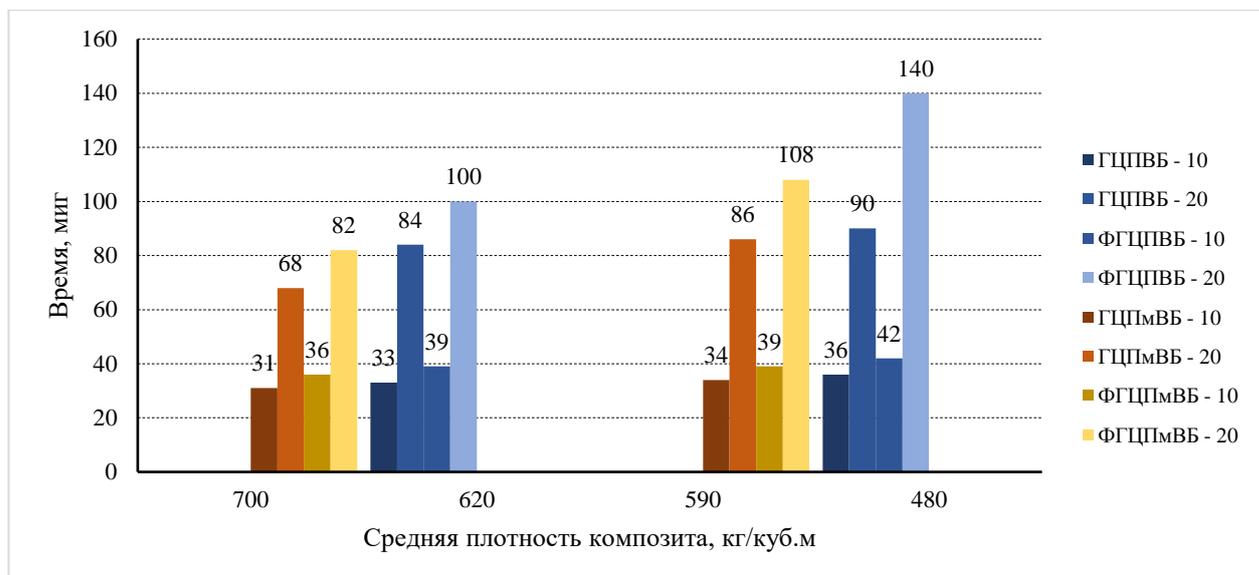


Рисунок 4.20 – Предел огнестойкости слоистых конструкций по критериям теплопроводности (вверху) и несущей способности (внизу)

ГЦПВБ, ФГЦПВБ – гипсоцементнопепловермикулитобетонные и фиброгипсоцементнопепловермикулитобетонные композиты;

ГЦПМВБ, ФГЦПМВБ – гипсоцементнопемзовермикулитобетонные и фиброгипсоцементнопемзовермикулитобетонные композиты;

10, 20 – толщина огнезащитного слоя, мм

Таким образом, применение полидисперсного фибрового армирования базальтовыми и полипропиленовыми волокнами в сочетании с матрицей на основе

комбинированного вяжущего строительный гипс + портландцемент + вулканическая пемза в качестве АМД и заполнителя со вспученным вермикулитом обеспечивает получение эффективных огнезащитных композитов. Предел огнестойкости в первую очередь определяется толщиной и коэффициентом теплопроводности огнезащитного слоя.

4.3. Влияние технологических факторов на свойства фиброгипсоцементновермикулитобетонных композитов с применением вулканических пород

Для приготовления смесей, содержащих пористые заполнители – вспученный вермикулит и вулканическую пемзу, использован серийно выпускаемый турбулентный смеситель. Вследствие высокой пористости вспученного вермикулита в процессе перемешивания смеси возможно частичное разрушение его зерен, вследствие чего последовательность загрузки материалов в смеситель при приготовлении фиброгипсоцементных смесей, содержащих в качестве АМД и заполнителя пепел либо пемза, существенно влияет на свойства как смесей, так и композитов [31].

Изучено влияние на свойства ФГЦВБ смесей и композитов следующих схем очередности загрузки компонентов, в т.ч. вулканических пород, в смеситель:

- схема 1, одностадийная – подача воды затворения, содержащей добавку СДО, с последующей подачей предварительно всухую перемешанных составляющих комбинированного вяжущего (гипс строительный, ПЦ, АМД - либо вулканического пепла, либо вулканической пемзы фракции 0-0,16 мм), дисперсной арматуры (базальтового, полипропиленового либо базальтового+полипропиленового волокон) и заполнителя – вспученного вермикулита и вулканической пемзы фракции 0,16 – 0,63 мм;

- схема 2, двухстадийная – подача воды затворения, содержащей добавку СДО, с последующей подачей остальных компонентов смеси в следующей очередности: первая стадия – подача и перемешивание до однородной консистенции

предварительно всухую перемешанных составляющих комбинированного вяжущего (гипс строительный, ПЦ, АМД - либо вулканического пепла либо вулканической пемзы фракции 0-0,63 мм), дисперсной арматуры (базальтового, полипропиленового либо базальтового+полипропиленового волокон), вторая стадия – подача заполнителя (вспученный вермикулит) с окончательным перемешиванием смеси до однородной консистенции.

Схемы 1 и 2 приготовления смесей с вулканическим пеплом и пемзой представлены на рисунке 4.21.

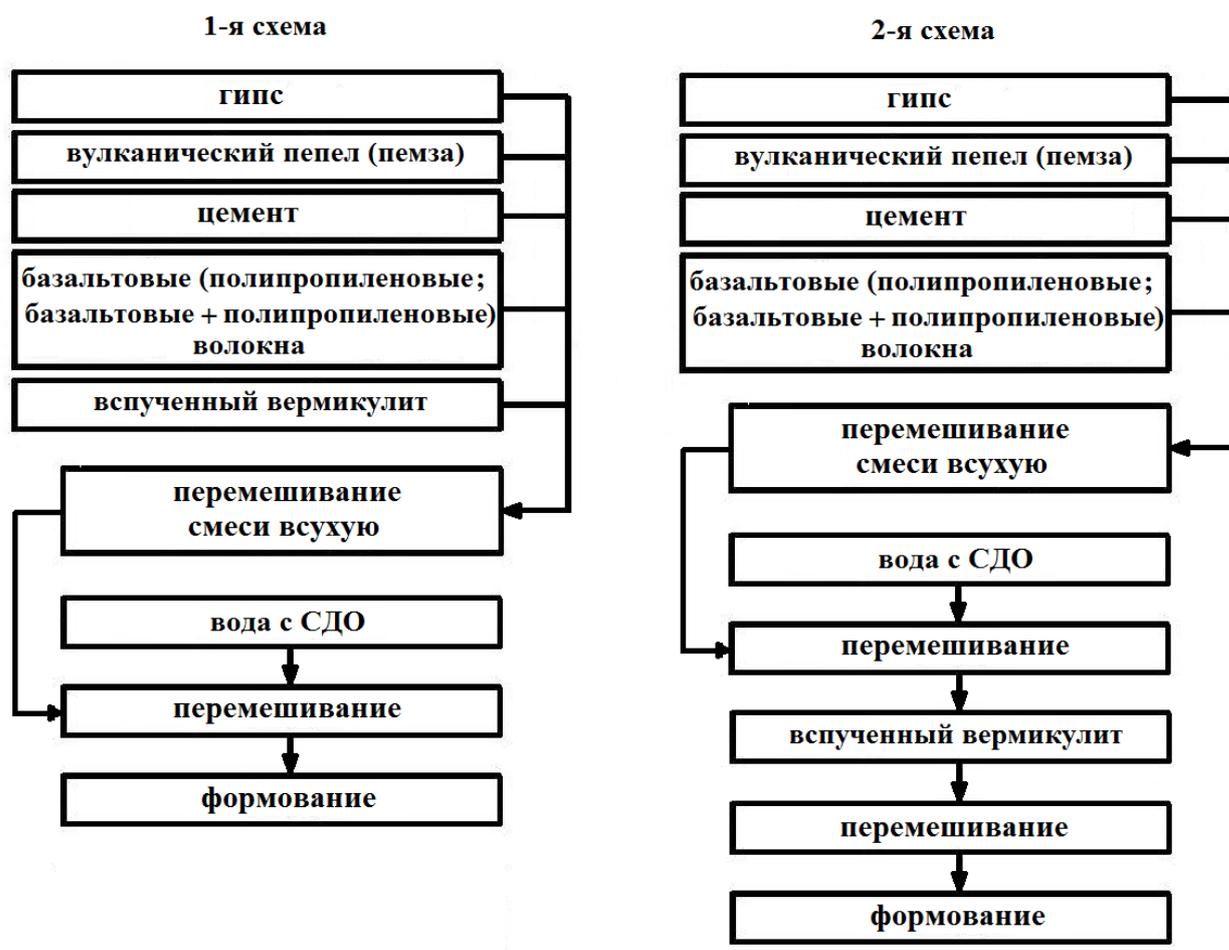


Рисунок. 4.21 – Схемы 1 и 2 приготовления ФГЦВБ смесей с применением вулканических пепла и пемзы

При реализации рассматриваемых схем приготовления литых смесей обеспечивается равномерное распределение волокон (базальтовых, полипропиленовых, базальтовых+полипропиленовых) и качественная их распушка. Следует отметить, что производство литых смесей возможно, как по первой, так и по второй

схемам, но при реализации второй схемы обеспечивается образование более качественной плотной оболочки вокруг зерна пористого заполнителя, что способствует формированию более плотной структуры и, закономерно, повышению прочности. При реализации первой схемы более низкая прочность композита обусловлена формированием более тонкой оболочки вследствие изначального попадания части комбинированного вяжущего в поры вспученного вермикулита. К подобному выводу пришли и авторы [31] при изучении вермикулитобетонов на ПЦ. В случае приготовления жестких смесей возможна только первая схема.

В таблице 4.23 представлены результаты исследования влияния вышеуказанных технологических факторов приготовления литых смесей. Составы ФГЦВБ смеси, содержащей вулканический пепел (ФГЦПВБ), и способы формирования представлены в таблице 4.24.

Таблица 4.23 – Состав и свойства ФГЦПВБ композитов

№ п/п	Состав смеси, %							Схема приготовления	ρ , кг/м ³	Предел прочности, МПа	
	Г	В, 0,16–5 мм	П, 0-0,16 мм	ПЦ	волокно		СДО			R_f	R
					Б	ПП					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	47,7	35,4	3,5	12,1	1,2	–	0,1	1	625	2,3	3,3
2	47,7	35,4	3,5	12,1	1,2	–	0,1	2	620	2,6	3,7
3	40,1	45,33	3,0	10,0	1,5	–	0,07	1	480	1,3	1,6
4	40,1	45,33	3,0	10,0	1,5	–	0,07	2	480	1,5	2,0
5	47,7	36,22	3,5	12,1	–	0,38	0,1	1	620	1,4	3,0
6	47,7	36,22	3,5	12,1	–	0,38	0,1	2	625	1,6	3,4
7	40,1	46,35	3,0	10,0	–	0,48	0,07	1	480	0,9	1,7
8	40,1	46,35	3,0	10,0	–	0,48	0,07	2	480	1,1	1,9
9	47,7	35,02	3,5	12,1	1,2	0,38	0,1	1	625	2,9	4,0
10	47,7	35,02	3,5	12,1	1,2	0,38	0,1	2	625	3,2	4,5
11	40,1	44,85	3,0	10,0	1,5	0,48	0,07	1	480	1,6	2,1
12	40,1	44,85	3,0	10,0	1,5	0,48	0,07	2	480	1,9	2,3

Примечание: Г – гипс строительный; В – вспученный вермикулит; П – вулканический пепел; ПЦ – портландцемент; Б – базальтовое; ПП – полипропиленовое; ρ – средняя плотность; R_f – при изгибе; R – при сжатии

Таблица 4.24 – Состав ФГЦПВБ композитов и способы формования изделий

№ п/п	Состав смеси, %						СДО	Способ формования
	Г	В, 0,16–5 мм	П, 0-0,16 мм	ПЦ	волокно			
					Б	ПП		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	47,7	35,4	3,5	12,1	1,2	–	0,1	литье
2	47,7	35,4	3,5	12,1	1,2	–	0,1	вибрирование
3	47,7	35,4	3,5	12,1	1,2	–	0,1	вибрирование с пригрузом
4	40,1	45,33	3,0	10,0	1,5	–	0,07	литье
5	40,1	45,33	3,0	10,0	1,5	–	0,07	вибрирование
6	40,1	45,33	3,0	10,0	1,5	–	0,07	вибрирование с пригрузом
7	47,7	36,22	3,5	12,1	–	0,38	0,1	литье
8	47,7	36,22	3,5	12,1	–	0,38	0,1	вибрирование
9	47,7	36,22	3,5	12,1	–	0,38	0,1	вибрирование с пригрузом
10	40,1	46,35	3,0	10,0	–	0,48	0,07	литье
11	40,1	46,35	3,0	10,0	–	0,48	0,07	вибрирование
12	40,1	46,35	3,0	10,0	–	0,48	0,07	вибрирование с пригрузом
13	47,7	35,02	3,5	12,1	1,2	0,38	0,1	литье
14	47,7	35,02	3,5	12,1	1,2	0,38	0,1	вибрирование
15	47,7	35,02	3,5	12,1	1,2	0,38	0,1	вибрирование с пригрузом
16	40,1	44,85	3,0	10,0	1,5	0,48	0,07	литье
17	40,1	44,85	3,0	10,0	1,5	0,48	0,07	вибрирование
18	40,1	44,85	3,0	10,0	1,5	0,48	0,07	вибрирование с пригрузом

Примечание: Г – гипс строительный; В – вспученный вермикулит; П – вулканический пепел; ПЦ – портландцемент; Б – базальтовое; ПП – полипропиленовое; ρ – средняя плотность

На рисунках 4.22 и 4.23 показано влияние способа формования (литье, вибрирование, вибрирование с пригрузом) на пределы прочности при изгибе R_f и сжатии R ФГЦПВБ композитов со средней плотностью 620 кг/м^3 (рисунок 4.22) и 480 кг/м^3 (рисунок 4.23).

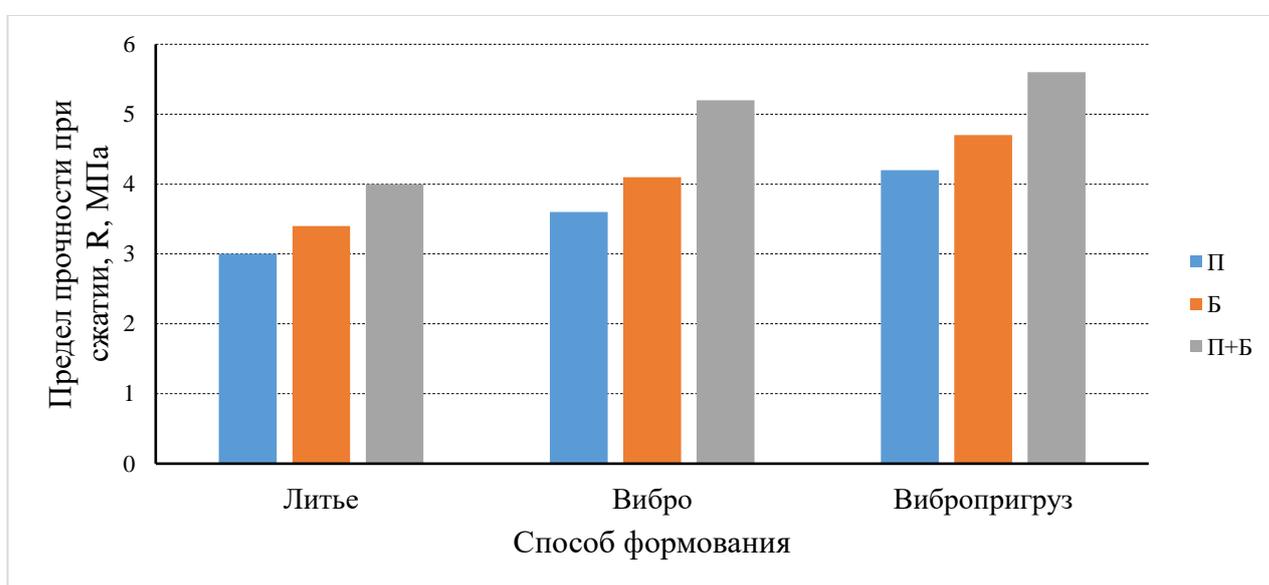
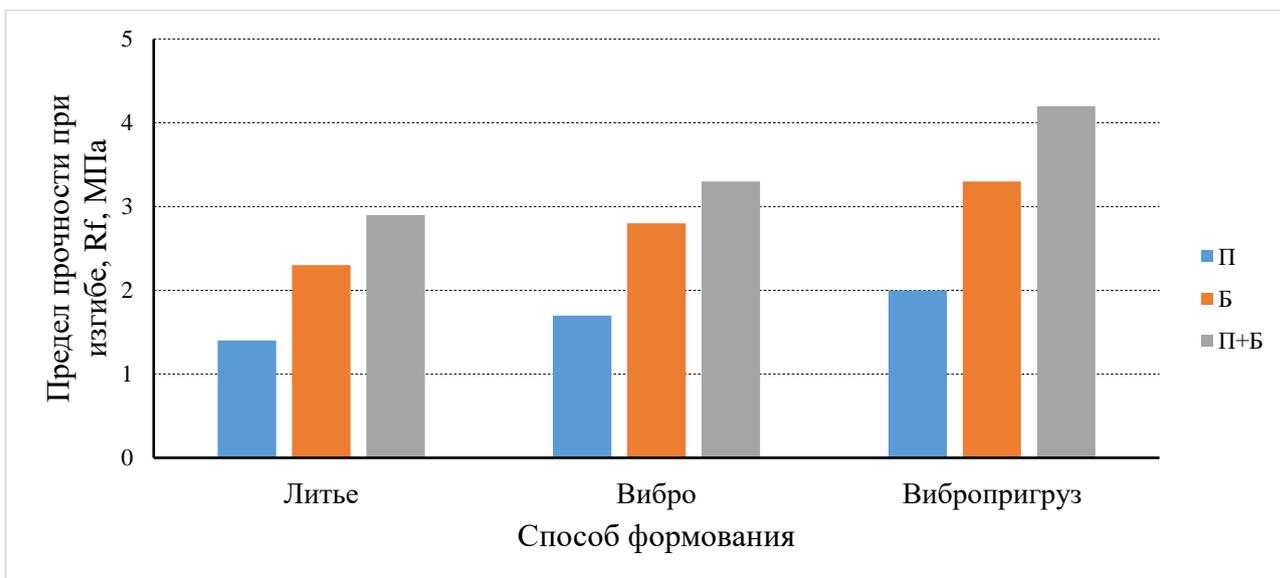


Рисунок 4.22 – Зависимость предела прочности при изгибе (вверху) и сжатии (внизу) фиброгипсоцементновермикулитобетонного композита плотностью 620 кг/м³ с применением вулканического пепла от способов формования и параметров фибрового армирования

П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

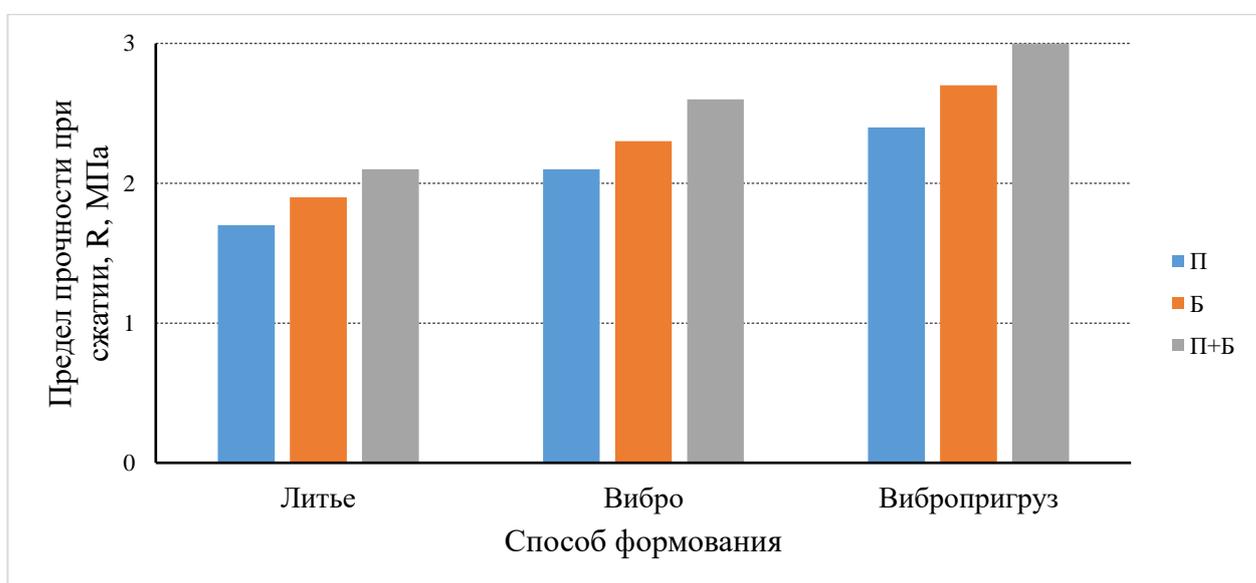
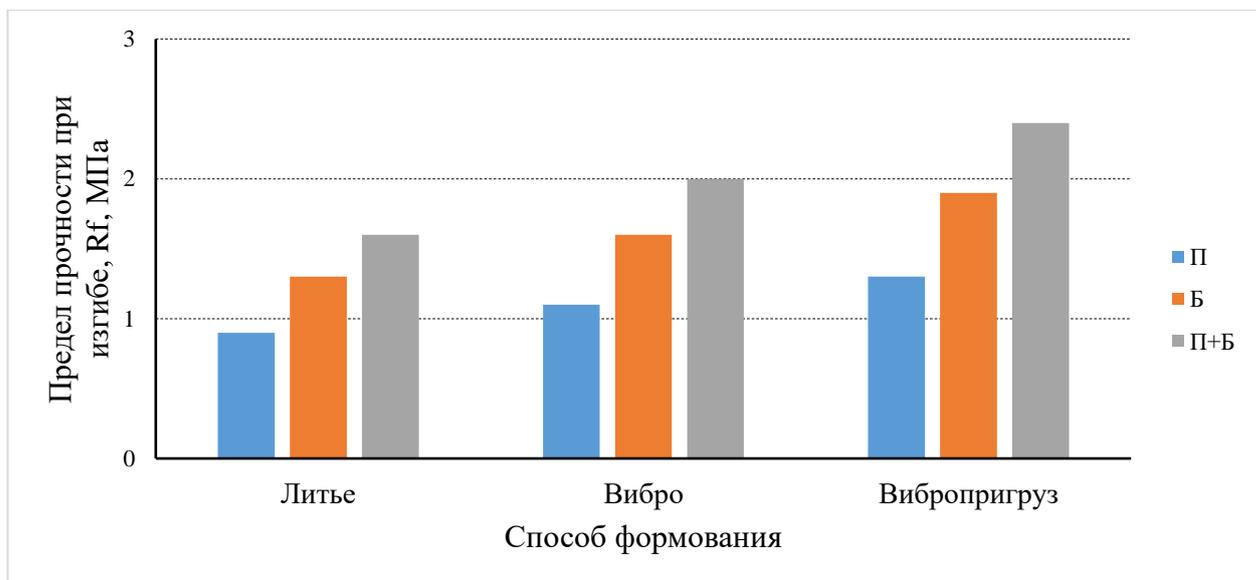


Рисунок 4.23 – Зависимость предела прочности при изгибе (вверху) и сжатии (внизу) фиброгипсоцементновермикулитобетонного композита плотностью 480 кг/м³ с применением вулканического пепла от способов формования и параметров фибрового армирования

П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

На следующем этапе (таблица 4.25) изучено влияние схемы приготовления литых смесей на пределы прочности при изгибе и сжатии ФГЦВБ композитов, содержащих вулканическую пемзу (ФГЦПмВБ). В таблице 4.26 приведены составы ФГЦПмВБ смесей для различных способов формования.

Таблица 4.25 – Состав и свойства ФГЦПмВБ композитов

№ п/п	Соотношение компонентов в смеси, мас. %						Схема приготовления смеси	ρ, кг/м ³	Предел прочности, МПа	
	Г	В, 0,63–5 мм	Пм, 0–0,63 мм	ПЦ	Б	СДО			R _f	R
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	47,7	15,56	23,34	12,1	1,2	0,1	1	705	3,6	4,4
2	47,7	15,56	23,34	12,1	1,2	0,1	2	705	4,2	5,2
3	40,1	19,33	29,00	10,0	1,5	0,07	1	590	3,3	3,6
4	40,1	19,33	29,00	10,0	1,5	0,07	2	590	3,8	4,6

Примечание: Г – гипс строительный; В – вспученный вермикулит; Пм – вулканическая пемза; ПЦ – портландцемент; Б – базальтовое волокно; ρ - средняя плотность; R_f – при изгибе; R – при сжатии

Таблица 4.26 – Состав ФГЦПмВБ композитов и способы формования изделий

№ п/п	Соотношение компонентов в смеси, мас. %						Способ формования
	Г	В, 0,63–5 мм	Пемза, 0–0,63 мм	ПЦ	базальтовое волокно	СДО	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	47,7	15,56	23,34	12,1	1,2	0,1	литье
2	47,7	15,56	23,34	12,1	1,2	0,1	вибрирование
3	47,7	15,56	23,34	12,1	1,2	0,1	вибрирование с пригрузом
4	40,1	19,33	29,00	10,0	1,5	0,07	литье
5	40,1	19,33	29,00	10,0	1,5	0,07	вибрирование
6	40,1	19,33	29,00	10,0	1,5	0,07	вибрирование с пригрузом

На рисунках 4.24 и 4.25 показано влияние способов формования (литье, вибрирование, вибрирование с пригрузом) на пределы прочности при изгибе R_f и сжатии R ФГЦПмВБ композитов со средней плотностью 705 кг/м³ (рисунок 4.24) и 590 кг/м³ (рисунок 4.25).

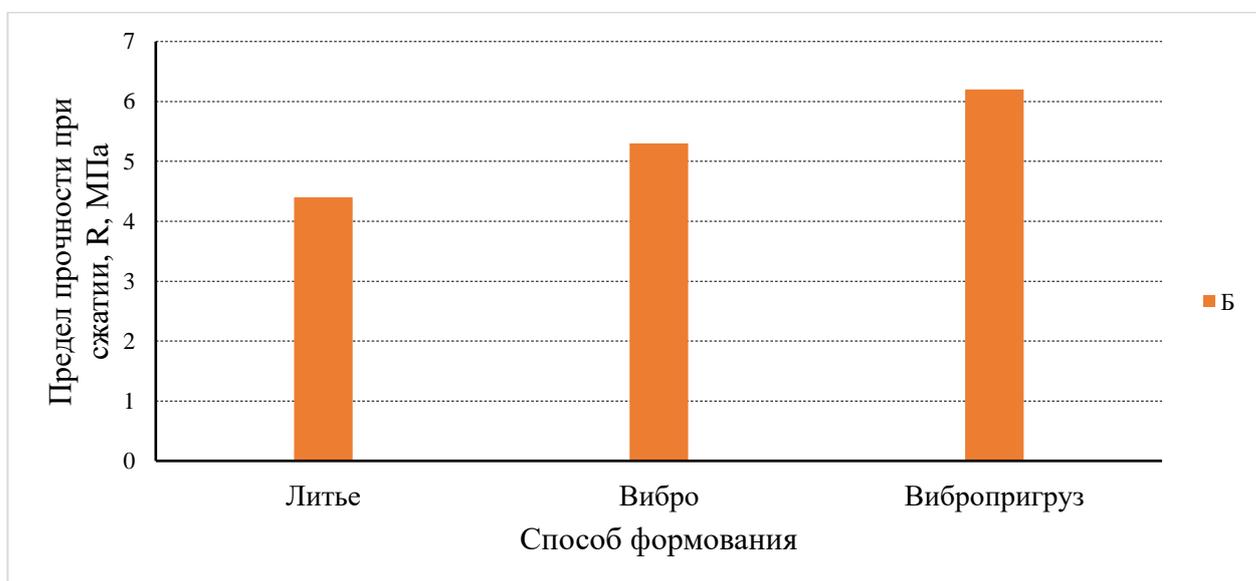
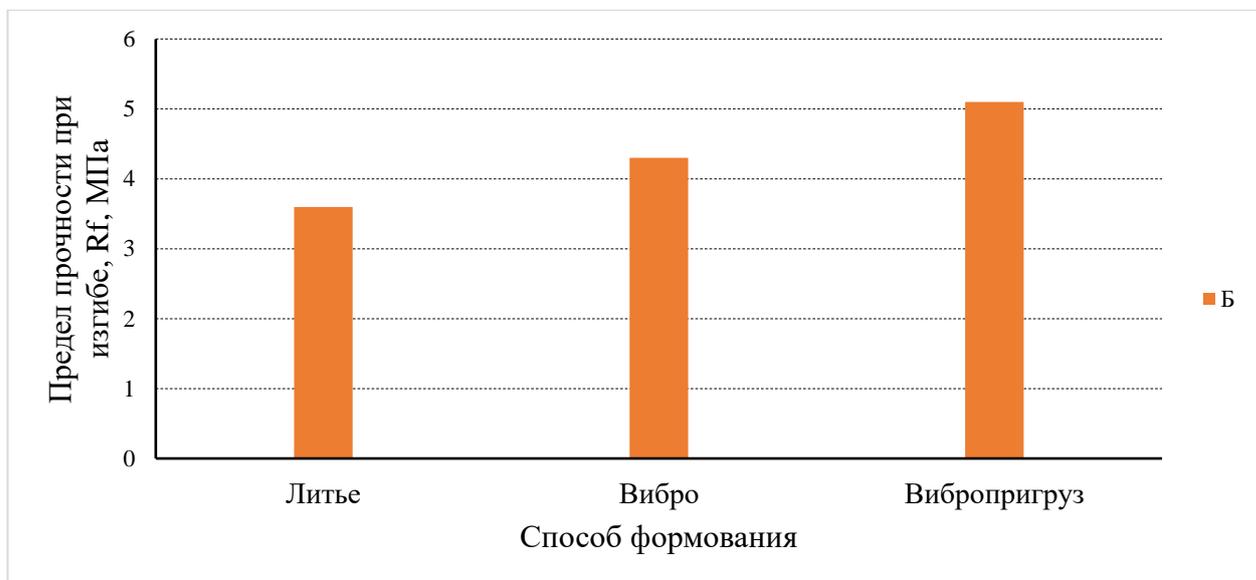


Рисунок 4.24 – Зависимость предела прочности при изгибе (вверху) и сжатии (внизу) ФГЦПмВБ композита плотностью 705 кг/м³ от способов формования и параметров фибрового армирования

Б – базальтовое волокно

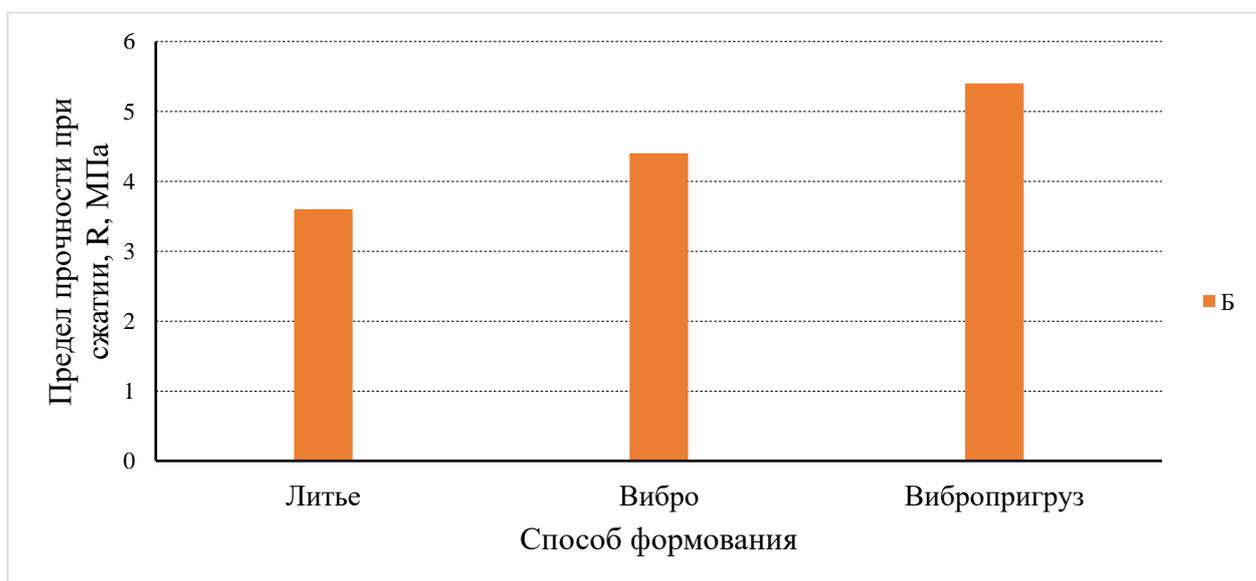
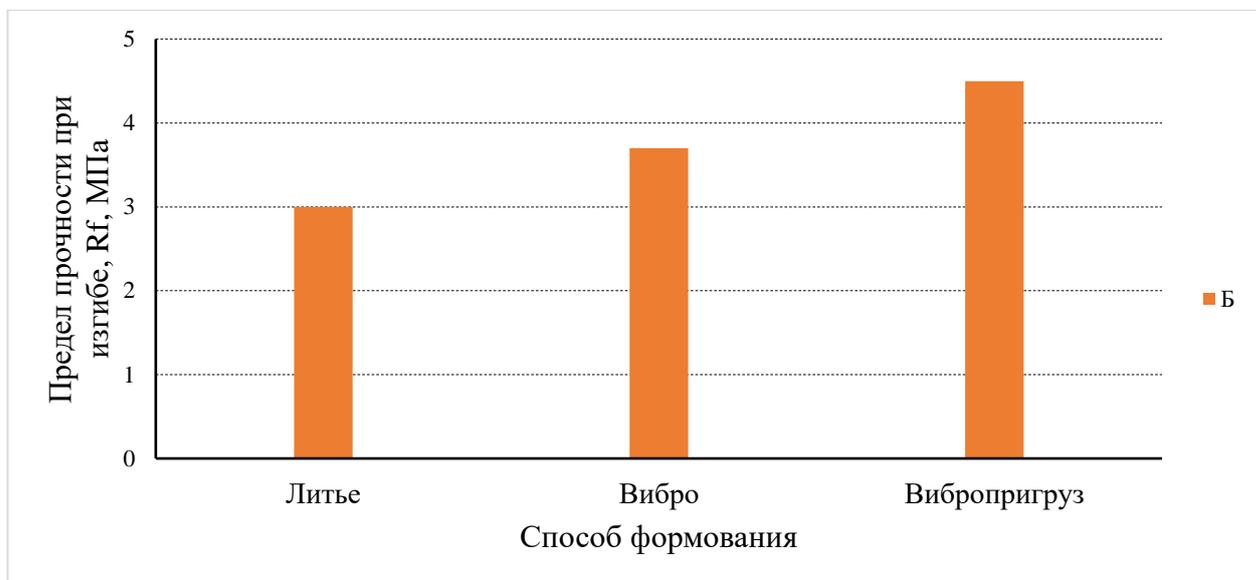


Рисунок 4.25 – Зависимость предела прочности при изгибе (вверху) и сжатии (внизу) ФГЦПмВБ композита плотностью 590 кг/м³ от способов формования и параметров фибрового армирования

Б – базальтовое волокно

Выводы по четвертой главе

1. При введении в состав ГЦПВБ композитов, содержащих вулканический пепел или пемзу объем вовлеченного воздуха составляет от 2,3 до 3,1 % на 0,1 % СДО при дозировке СДО до 0,2 % и от 0,8 до 1 % при дозировке СДО 0,3 %, соотношение Г : В мало влияет на величину воздухововлечения. Дозировка СДО

до 0,2 % не оказывает негативного влияния на предел прочности при сжатии в возрасте 28 сут независимо от соотношения $\Gamma : B$, а при дозировке СДО 0,3 % снижение предела прочности при сжатии не превышает 7 %.

2. При армировании полипропиленовой фиброй незначительно, в пределах 3 – 7 % возрастает предел прочности при сжатии в зависимости от возраста композита, при этом повышение предела прочности при изгибе достигает 13 %. В случае применения более высокомодульных в сравнении с полипропиленовыми базальтовых волокон повышение предела прочности при изгибе достигает значений от 1,61 раза через 2 ч до 1,73 раза через 28 сут, при этом в зависимости от возраста композита предел прочности при сжатии возрастает от 1,15 до 1,22 раза. Полидисперсное армирование базальтовым волокном в сочетании с полипропиленовой фиброй обеспечивает рост предела прочности при сжатии от 1,67 раза через 2 ч до 1,68 раза через 28 сут, а рост предела прочности при изгибе достигает значений от 2,17 раза через 2 ч до 2,3 раза через 28 сут. Параметры дисперсного армирования не оказывают значительного влияния на зависимость $R_f = f(R)$ исследованных композитов.

3. В содержащих вулканическую пемзу композитах превышение предела прочности при сжатии относительно составов, содержащих вулканический пепел при наличии дисперсного армирования составляет до 1,15 раза при плотности 620 кг/м³ и до 1,73 раза при плотности 470 кг/м³, при отсутствии дисперсного армирования соответственно до 1,19 раза при плотности 620 кг/м³ и до 1,85 раза при плотности 470 кг/м³. Дисперсное армирование при равной прочности при сжатии повышает предел прочности при изгибе до 1,42 раза, при этом вид АМД на соотношение R_f/R влияет незначительно.

4. Полидисперсное армирование базальтовыми и полипропиленовыми волокнами повысило предел прочности при сжатии и изгибе до 1,3 раза относительно композитов на базальтовых волокнах. Применение полидисперсного фибрового армирования базальтовыми и полипропиленовыми волокнами в сочетании с матрицей на основе комбинированного вяжущего «строительный гипс +

портландцемент + вулканическая пемза» в качестве АМД и заполнителя в сочетании со вспученным вермикулитом обеспечивает получение эффективных огнезащитных композитов, предел огнестойкости которых в первую очередь определяется толщиной и коэффициентом теплопроводности огнезащитного слоя. Получены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры разработанных ФГЦПВБ и ФГЦПмВБ композитов.

5. Для приготовления фиброгипсовермикулитопеплобетонной и приготовления фиброгипсовермикулитопемзобетонной смеси целесообразно использовать турбулентный смеситель. Для литых смесей рекомендуется после подачи воды с добавкой СДО в смеситель вначале загружать предварительно перемешанную всухую смесь гипса, портландцемента, пепла (пемзы) и базальтового волокна, предварительно готовить смесь, а затем после добавления вспученного вермикулита повторно перемешать.

6. Формование изделий из теплоогнезащитных ФГЦПВБ и ФГЦПмВБ композитов целесообразно осуществлять по литьевой технологии. Метод вибропрессования рекомендуется для изготовления изделий, к которым предъявляются повышенные требования к прочности.

Глава 5. ТЕПЛООГНЕЗАЩИТНЫЕ ШТУКАТУРНЫЕ РАСТВОРЫ

5.1. Составы и свойства теплоогнезащитных штукатурных растворов на основе вулканического пепла и пемзы

Использованы материалы, описанные в гл.2:

- гипс строительный марки Г–5 БП;
- ПЦ ЦЕМ I 42,5 Н;
- вулканический пепел с максимальной крупностью зерен 2,5 мм;
- вулканическая пемза с максимальной крупностью зерен 2,5 мм;
- полифункциональная добавка Д–5 производства ООО НПП «Токар» (г. Владикавказ).

Составы и некоторые свойства штукатурных растворов с вулканическим пеплом представлены в таблице 5.1. Штукатурные смеси имели подвижность по погружению конуса 10 см (Π_k 3). Средняя плотность составов в момент испытаний составляла в 28 сут 1180–1200 кг/м³. Доля ПЦ в составе вяжущего Г+ПЦ 20 %.

Таблица 5.1 – Составы и свойства штукатурных растворов на пепле

№ №	(Г+ПЦ):П*	Д–5, % от массы вяжущего	Волокно, %**		Сроки схватывания, мин		Предел прочности, МПа					
			базальтовое	полипропиленовое			в возрасте					
							начало	конец	2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	1:1	–	–	–	3,7	6,2	2,3	4,2	5,1	8,6		
2		2			3,0	5,1	2,5	4,5	5,5	10,6		
3		3			2,7	4,6	2,4	4,3	5,2	10,7		
4		2	1,3		3,1	5,3	4,0	7,6	6,3	13,0		
5			–		3,2	5,4	2,7	4,8	5,7	10,9		
6			1,3		3,1	5,3	5,4	9,6	8,0	14,5		
7	1:2	–	–	–	6,4	11,5	1,7	3,1	3,5	6,4		
8		2			5,8	9,4	1,9	3,4	3,8	7,2		
9		3			5,2	8,2	1,8	3,5	3,9	7,0		
10		2	1,3		5,9	9,6	2,9	5,6	4,3	9,6		
11			–		6,0	9,5	2,1	3,8	4,0	7,5		
12			1,3		5,8	9,7	3,9	7,0	5,5	10,7		

Примечание: Г – гипс строительный; ПЦ – портландцемент; П – пепел вулканический; * – по массе; ** - по объему; R_f – при изгибе; R – при сжатии

Пределы прочности составов 2, 4-6 по таблице 5.1 представлены на рисунках 5.1 и 5.2. На рисунках 5.3 и 5.4 представлены значения прочности составов 4-6 относительно состава 2.

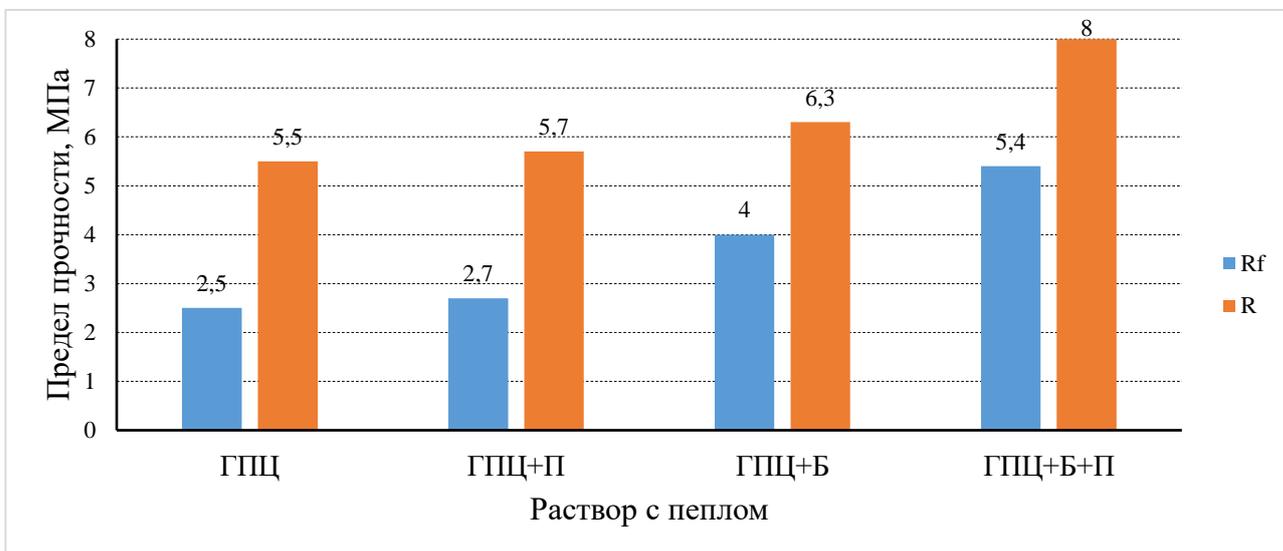


Рисунок 5.1 – Пределы прочности в возрасте 2 ч составов № 2,4-6 по таблице 5.1
 R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЦ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

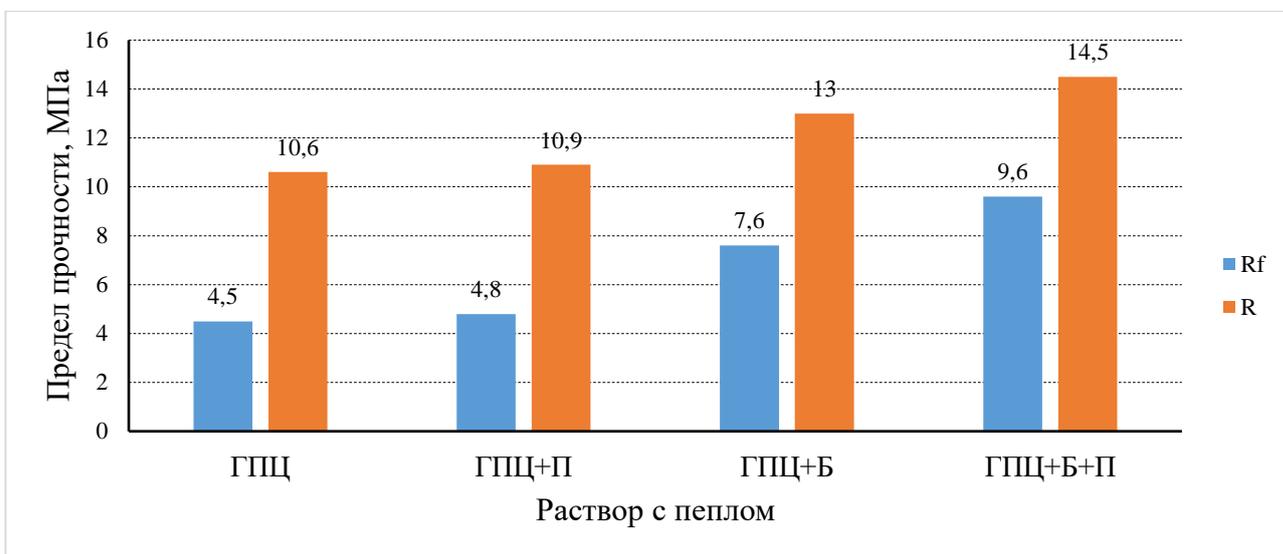


Рисунок 5.2 – Пределы прочности в возрасте 28 сут составов № 2,4-6 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЦ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

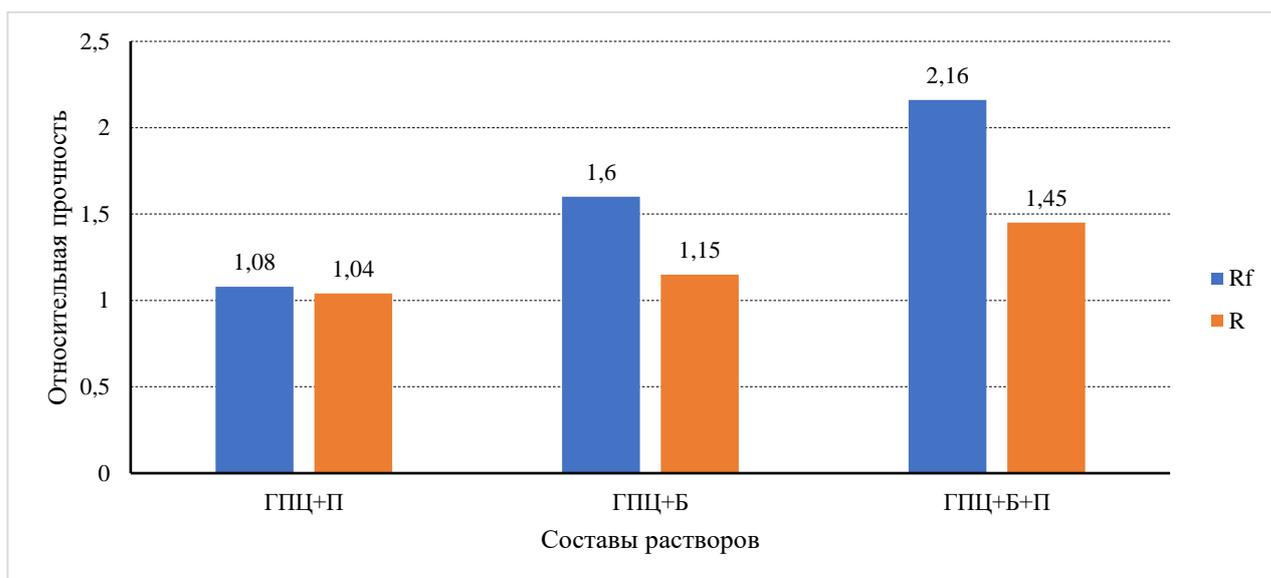


Рисунок 5.3 – Относительная прочность в возрасте 2 ч составов № 4-6 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЦ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

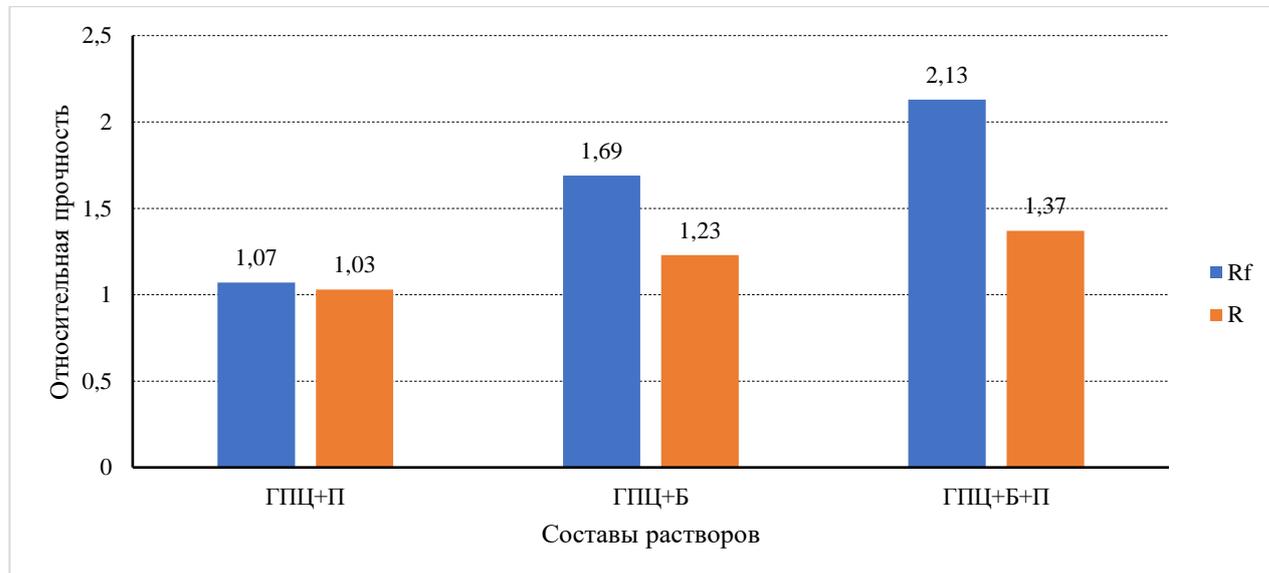


Рисунок 5.4 – Относительная прочность в возрасте 28 сут составов № 4-6 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЦ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

Пределы прочности составов 8,10-12 по таблице 5.1 представлены на рисунках 5.5 и 5.6. На рисунках 5.7 и 5.8 представлены значения прочности составов 10-12 относительно состава 8.

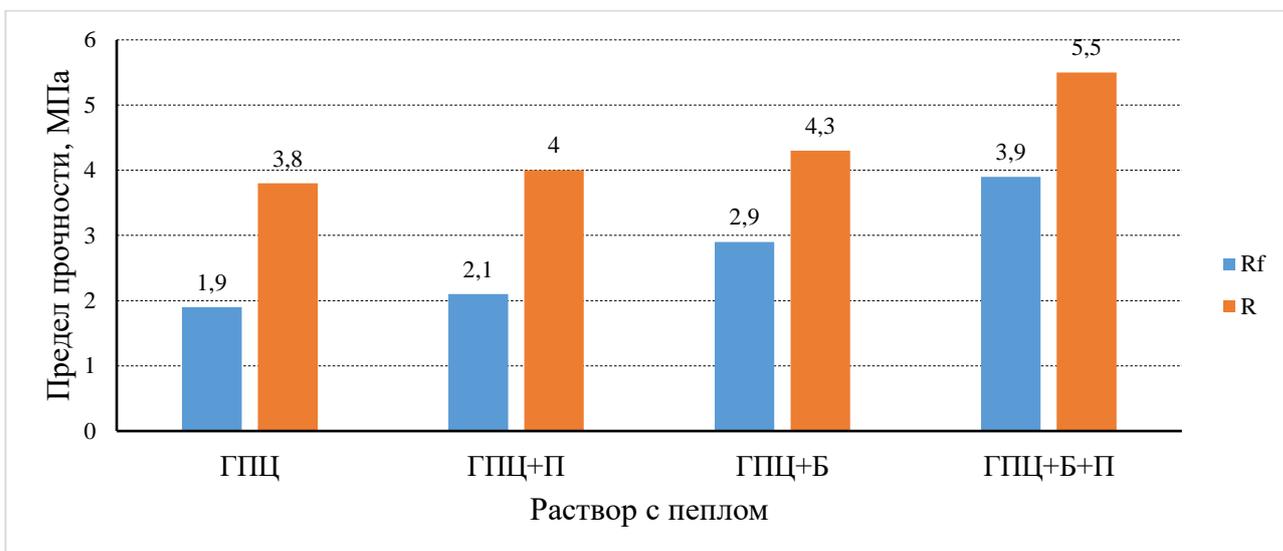


Рисунок 5.5 – Пределы прочности в возрасте 2 ч образцов № 8,10-12 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГЩ – гипс+пепел+Щ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

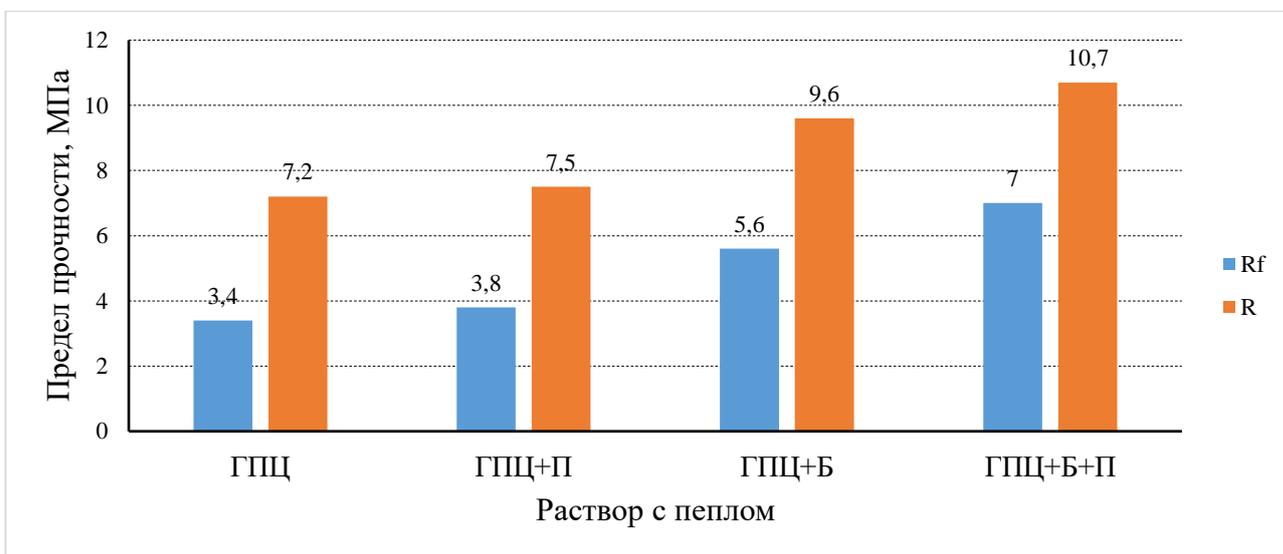


Рисунок 5.6 – Пределы прочности в возрасте 28 сут образцов № 8,10-12 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГЩ – гипс+пепел+Щ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

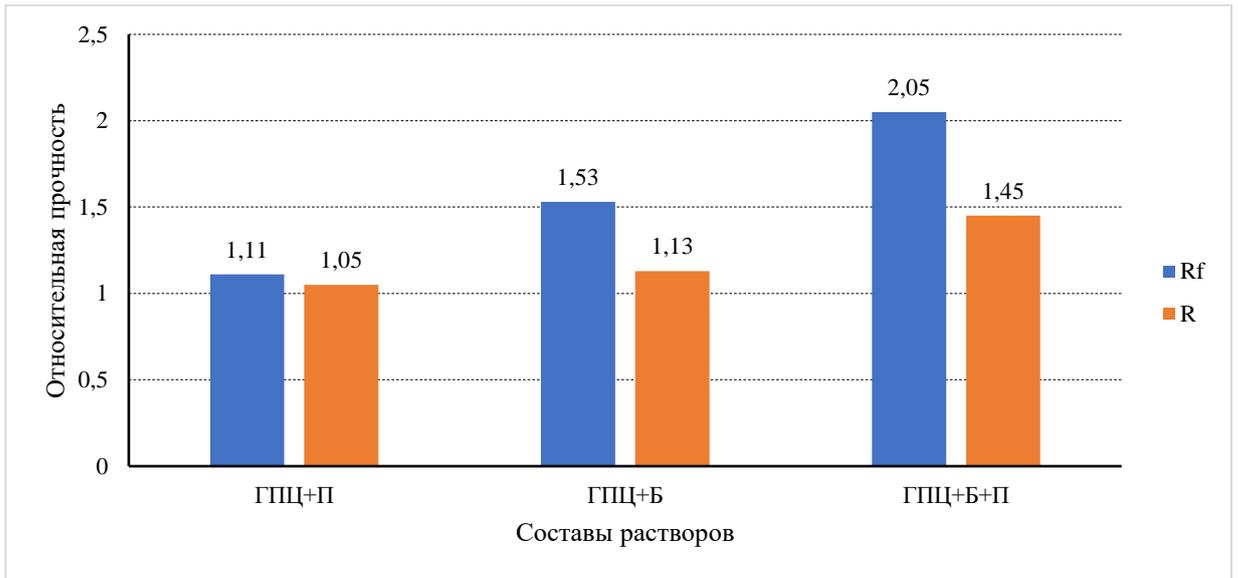


Рисунок 5.7 – Относительная прочность в возрасте 2 ч составов № 10-12 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

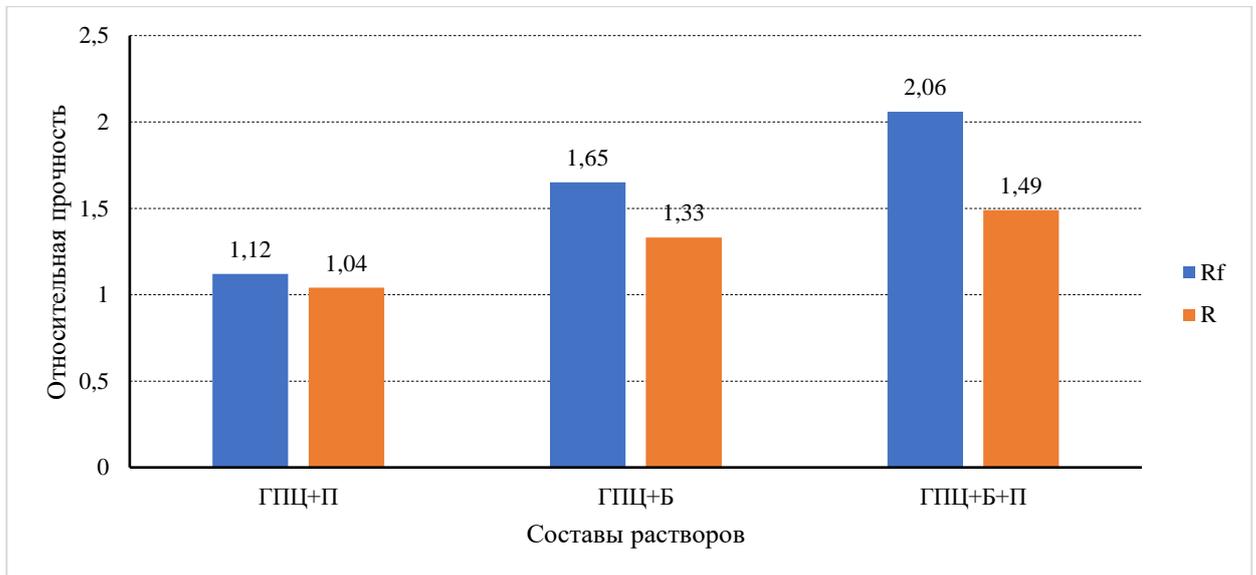


Рисунок 5.8 – Относительная прочность в возрасте 28 сут составов № 10-12 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R составов по таблице 5.1 показано на рисунке 5.9.

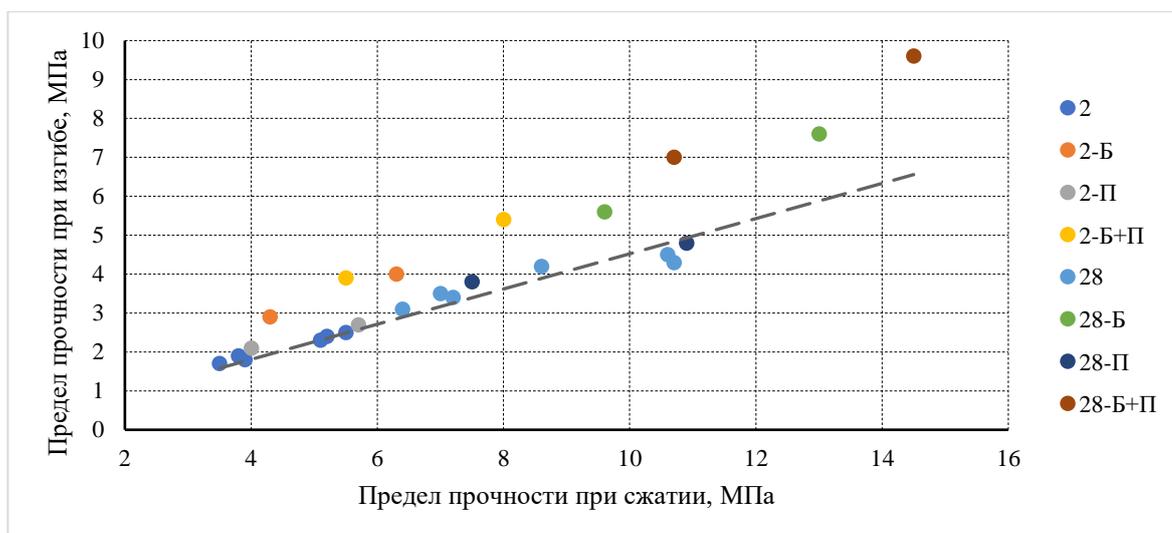


Рисунок 5.9 – Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R составов по таблице 5.1

2, 28 – возраст соответственно 2 ч и 28 сут; Б,П, Б+П – базальтовое волокно, полипропиленовая фибра

Предел прочности при изгибе R_f составов по таблице 5.1 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.1)$$

параметры уравнения ф. (5.1) представлены в таблице 5.2.

Таблица 5.2 – Параметры уравнения ф. (5.1)

Состав по табл. 5.1	Параметры уравнения ф.(5.1)	
	k	R^2 *
1-3, 7-9 (без фибры)	0,45 / 0,45**	0,89 / 0,89
4, 10 (базальтовые волокна Б)	0,65 / 0,58	0,99 / 1,0
5, 11 (полипропиленовая фибра П)	0,49 / 0,46	0,99 / 1,0
6, 12 (Б+П)	0,69 / 0,66	0,99 / 1,0

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации;

Представленные в таблице 5.1 и на рисунках 5.1 – 5.9 результаты показывают, что:

- введение Д-5 в состав смеси обеспечивает рост прочности при сжатии в 28 сут до 9 % при $(Г+ПЦ) : П = 1:2$ и до 24 % при $(Г+ПЦ):П = 1:1$, в возрасте 2 ч

рост незначительный, что объясняется влиянием Д-5 на формирование более плотной структуры (меньшей пористости) портландцементной составляющей вяжущего, для чего требуется длительное время;

- добавка Д-5, соотношение (Г+ПЩ) : П и возраст практически не влияют на зависимость $R_f = f(R)$ при отсутствии фибрового армирования, что закономерно, поскольку на указанную зависимость незначительно влияют рецептурные и технологические факторы;

- добавка Д-5 вызывает сокращение сроков схватывания до 20 – 30 %;

- базальтовые волокна обеспечивают рост предела прочности при изгибе относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,57 – 1,6 раза, через 28 сут в 1,65 – 1,69 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : П;

- полипропиленовые волокна обеспечивают рост предела прочности при изгибе относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,08 – 1,11 раза, через 28 сут в 1,07 – 1,12 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : П;

- полидисперсное армирование обеспечивает рост предела прочности при изгибе относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 2,05 – 2,16 раза, через 28 сут в 2,06 – 2,13 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : П, из чего можно сделать заключение, продолжительность твердения мало влияет на степень эффективности дисперсного армирования;

- базальтовые волокна обеспечивают рост предела прочности при сжатии относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,13 – 1,15 раза, через 28 сут в 1,23 – 1,33 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : П;

- полипропиленовые волокна обеспечивают рост предела прочности при сжатии относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,04 – 1,05 раза, через 28 сут в 1,03 – 1,04 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : П;

- полидисперсное армирование обеспечивает рост предела прочности при сжатии относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,45 раза, через 28 сут в 1,37 – 1,49 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : П, из

чего можно сделать заключение, продолжительность твердения мало влияет на степень эффективности дисперсного армирования;

- при равной прочности при сжатии рост предела прочности при изгибе составляет 1,02 – 1,09 раза при армировании полипропиленовой фиброй, 1,44 – 1,27 раза при армировании базальтовыми волокнами, 1,53 – 1,47 раза при полидисперсном армировании, причем с возрастом указанный рост прочности при изгибе снижается, из чего очевидна неэффективность армирования полипропиленовой фиброй для повышения прочности при изгибе.

Составы и некоторые свойства штукатурных растворов с вулканической пемзой представлены в таблице 5.3. Смеси имели литую консистенцию. Средняя плотность составов в момент испытаний составляла в 28 сут 1020–1050 кг/м³, т.е. несколько ниже, чем растворы на пепле.

Таблица 5.3 – Составы и свойства штукатурных растворов на пемзе

№ №	(Г+ПЦ) : Пм*	ПЦ, % в вяжу- щем	Д-5, % от массы вяжу- щего	Волокно, % **		Сроки схва- тывания, мин		Предел прочности					
				ба- заль- то- вое	поли- пропи- лено- вое			R _f ¹		R ²			
						в возрасте						2 ч	28 сут
				начало	ко- нец	2 ч	28 сут	2 ч	28 сут				
1	1:1	20	–	–	–	4,1	6,7	2,1	4,0	4,8	8,2		
2	1:1	20	2			3,4	5,6	2,3	4,2	5,2	10,2		
3	1:1	20	3			3,2	5,2	2,4	4,1	5,2	10,3		
4	1:1	20	2	1,3	–	3,6	5,8	3,7	7,2	5,9	12,6		
5	1:1	20	2	–	1,2	3,7	5,7	2,4	4,4	5,3	10,4		
6	1:1	20	2	1,3	1,2	3,6	5,7	5,0	9,2	7,6	13,9		
7	1:2	20	–	–	–	6,9	12,0	1,3	2,7	3,1	6,0		
8	1:2	20	2			6,2	9,9	1,5	3,1	3,5	6,6		
9	1:2	20	3			5,7	8,6	1,6	3,2	3,6	6,8		
10	1:2	20	2	1,3	–	6,4	10,0	2,4	5,1	3,8	9,1		
11	1:2	20	2	–	1,2	6,5	10,1	1,7	3,4	3,6	7,0		
12	1:2	20	2	1,3	1,2	6,4	10,0	3,4	6,5	5,1	10,2		

Примечания: Г – гипс строительный; ПЦ – портландцемент; Пм – пемза вулканическая; * – по массе; ** - по объему; R_f – при изгибе; R – при сжатии

Пределы прочности составов 2,4-6 по таблице 5.3 представлены на рисунках 5.10 и 5.11. На рисунках 5.12 и 5.13 представлены значения прочности составов 4-6 относительно состава 2.

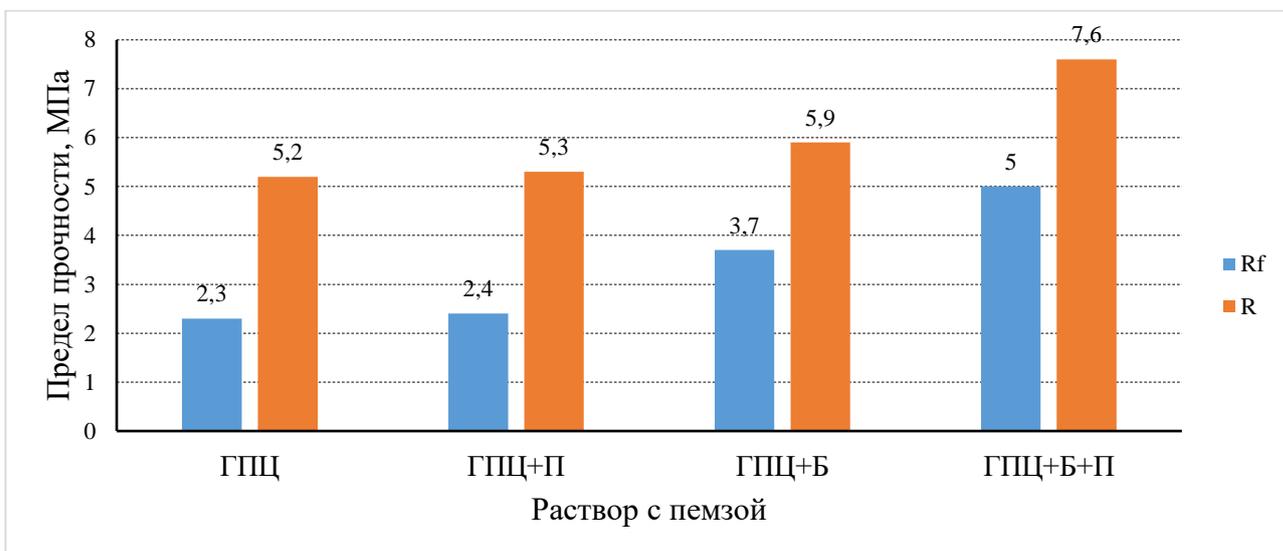


Рисунок 5.10 – Пределы прочности в возрасте 2 ч образцов № 2,4-6 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГЩ – гипс+пемза+ЩЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

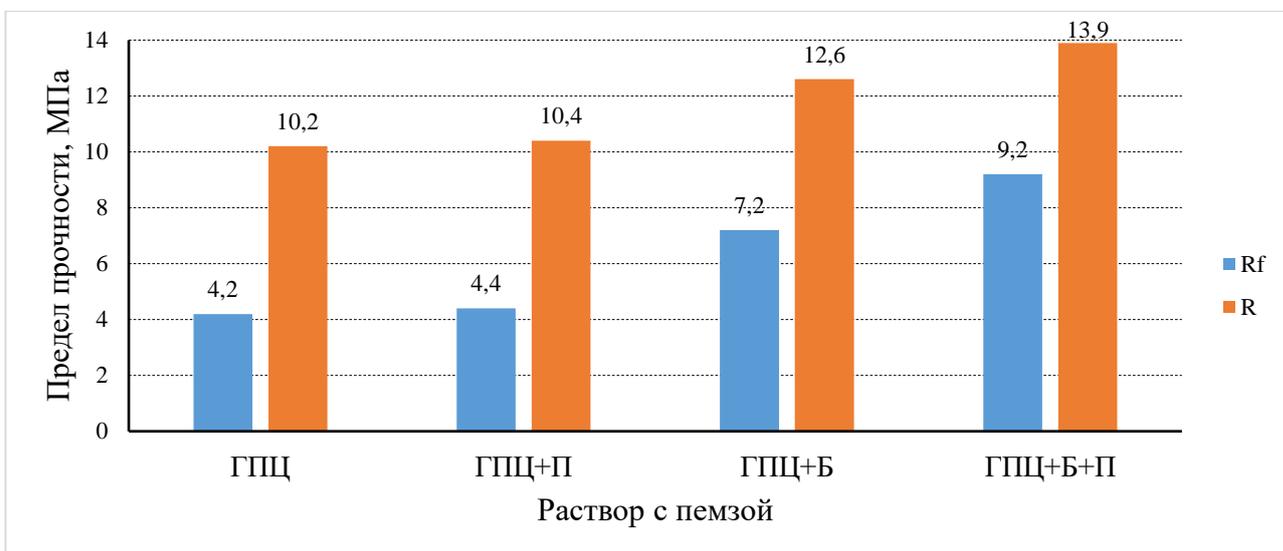


Рисунок 5.11 – Пределы прочности в возрасте 28 сут образцов № 2,4-6 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГЩ – гипс+пемза+ЩЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

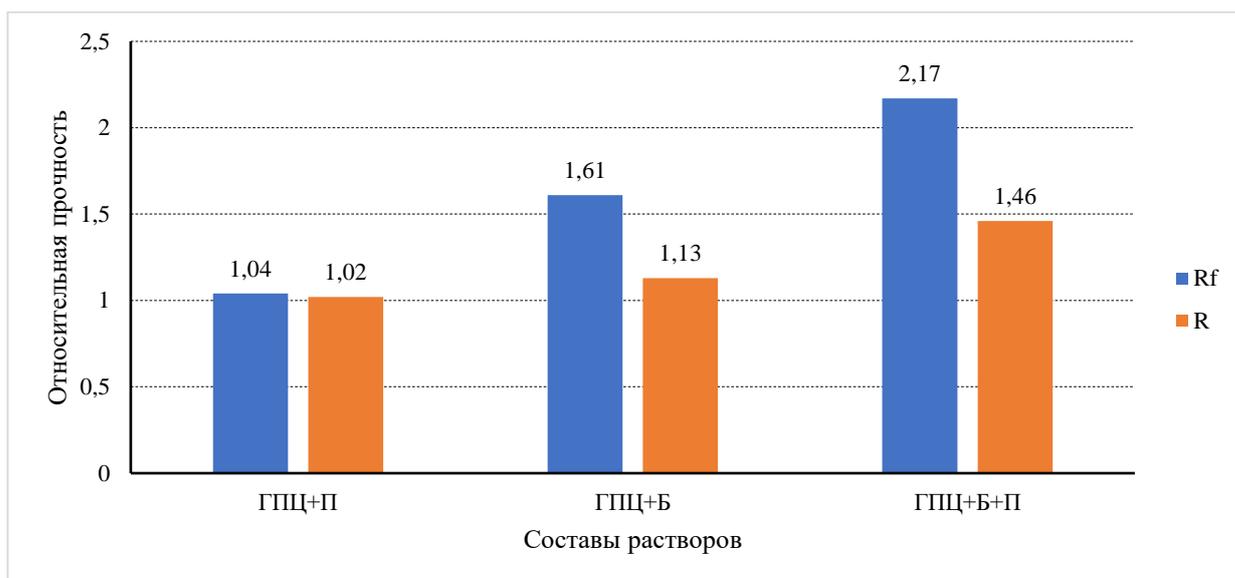


Рисунок 5.12 – Относительная прочность в возрасте 2 ч составов № 4-6 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЦ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

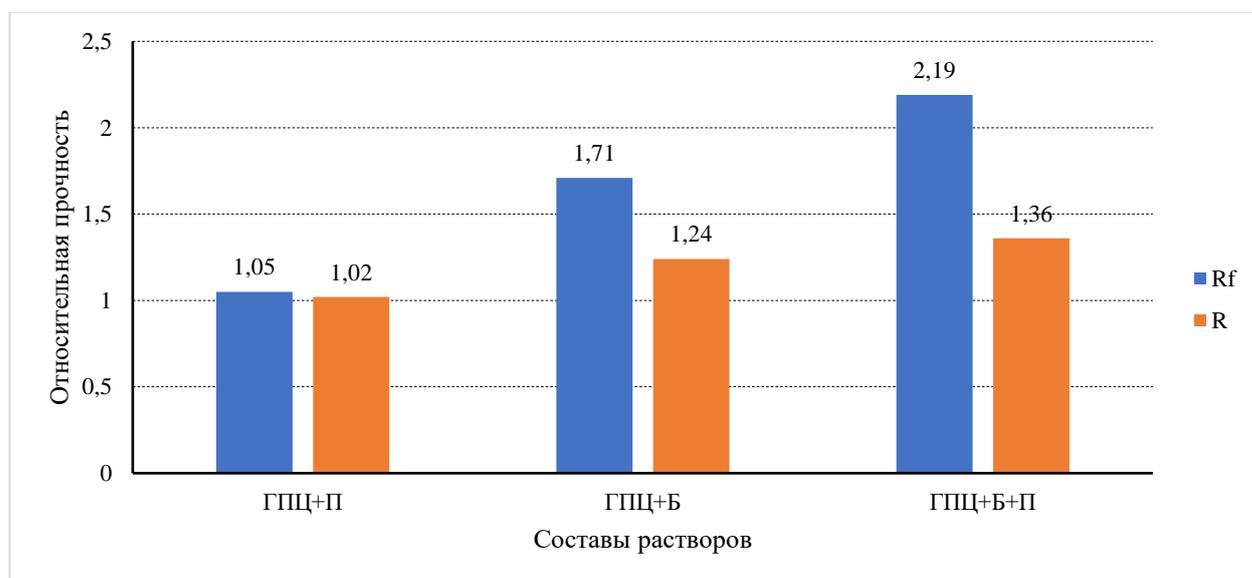


Рисунок 5.13 – Относительная прочность в возрасте 28 сут составов № 4-6 по таблице 5.1

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЦ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

Пределы прочности составов 8, 10-12 по таблице 5.3 представлены на рисунках 5.14 и 5.15. На рисунках 16 и 5.17 представлены значения прочности составов 10-12 относительно состава 8.

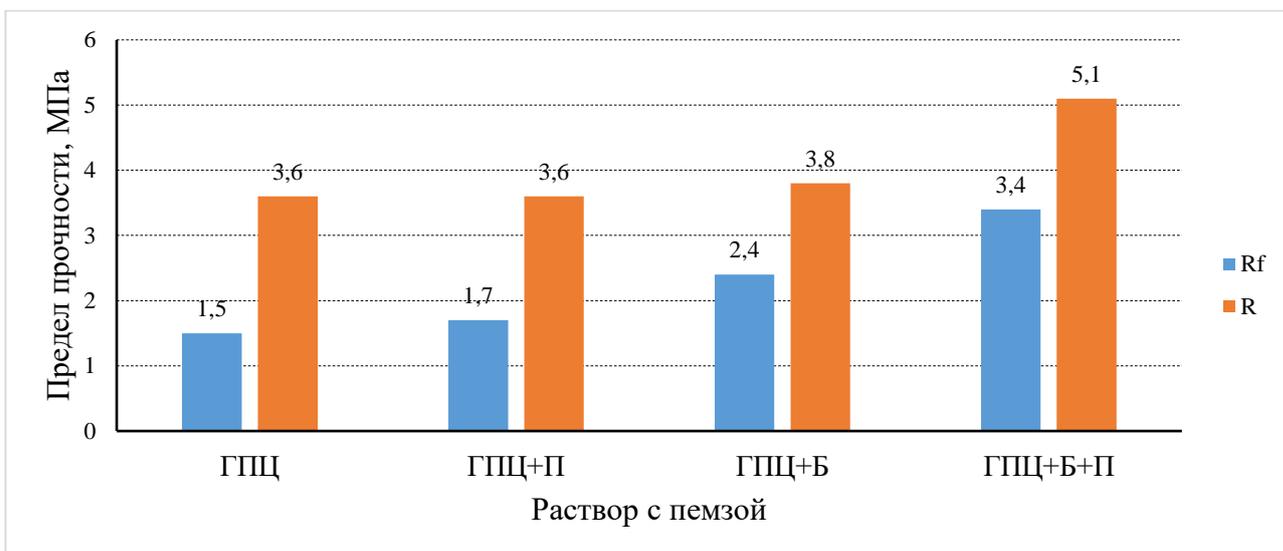


Рисунок 5.14 – Пределы прочности в возрасте 2 ч образцов № 8,10-12 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГЩ – гипс+пемза+ЩЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

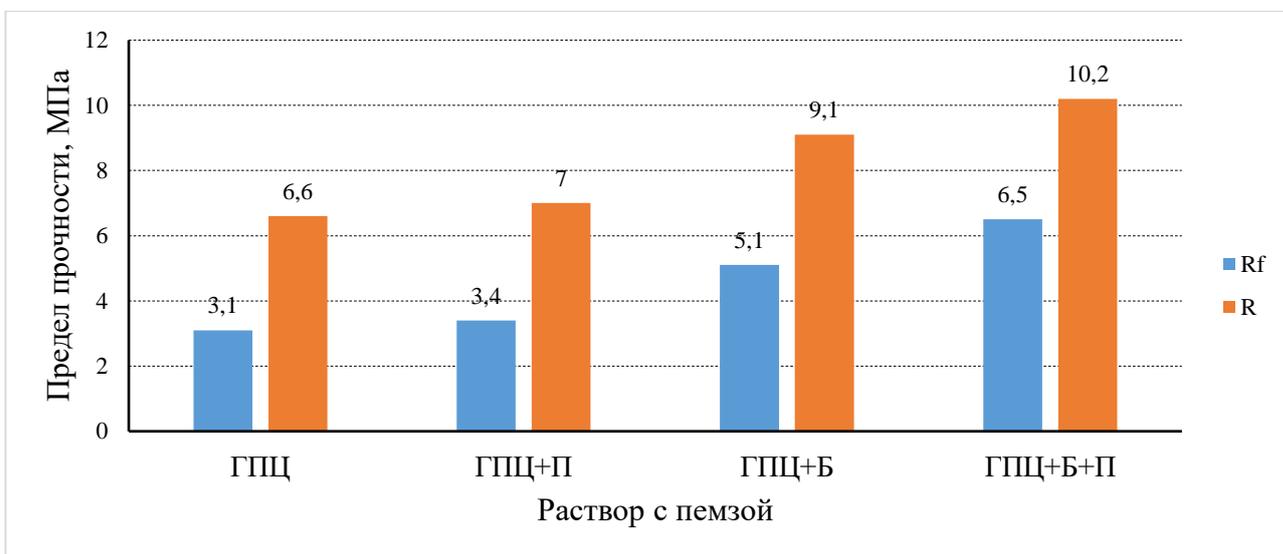


Рисунок 5.15 – Пределы прочности в возрасте 28 сут образцов № 8,10-12 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГЩ – гипс+пемза+ЩЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

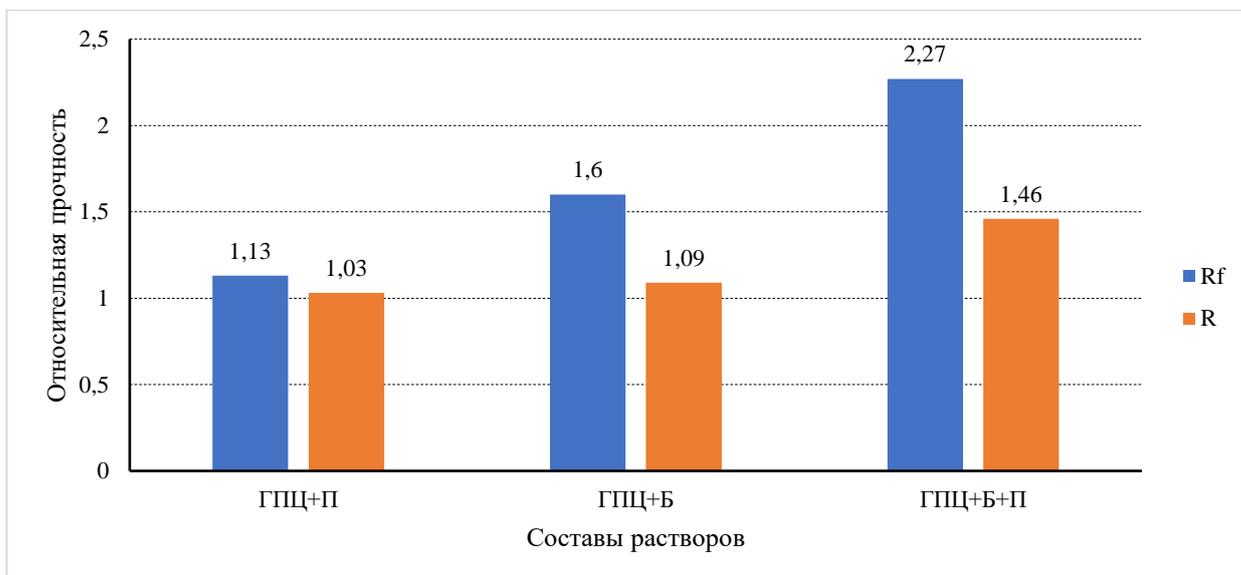


Рисунок 5.16 – Относительная прочность в возрасте 2 ч составов № 10-12 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

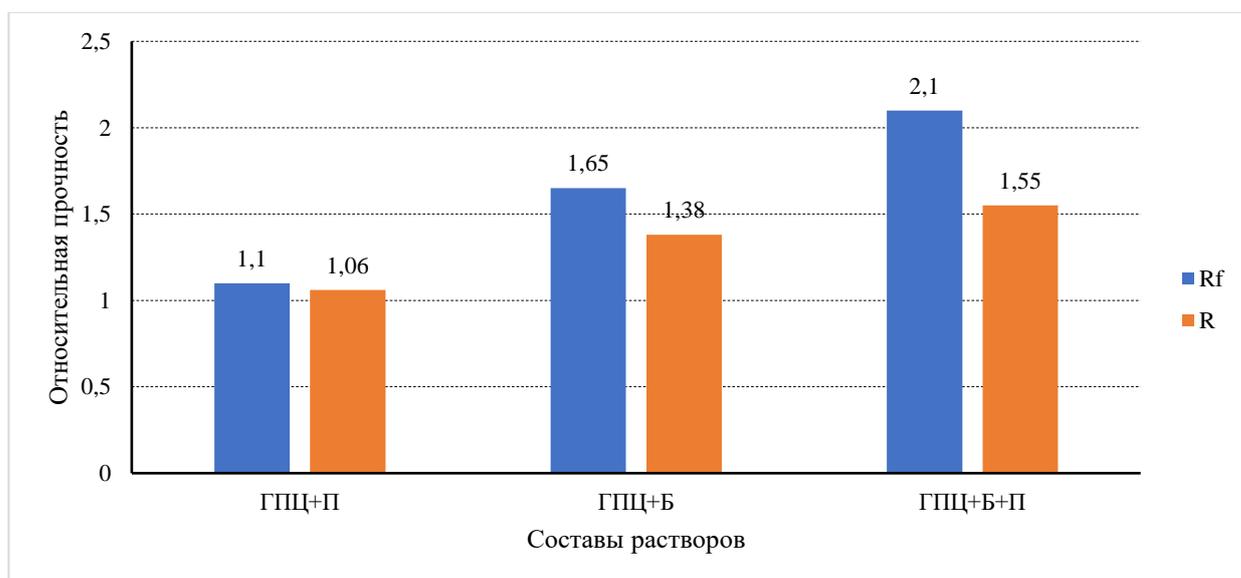


Рисунок 5.17 – Относительная прочность в возрасте 28 сут составов № 10-12 по таблице 5.3

R_f – при изгибе; R – при сжатии; ГПЦ – гипс+пепел+ПЩ; П – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно

Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R составов по таблице 5.3 показано на рисунке 5.18.

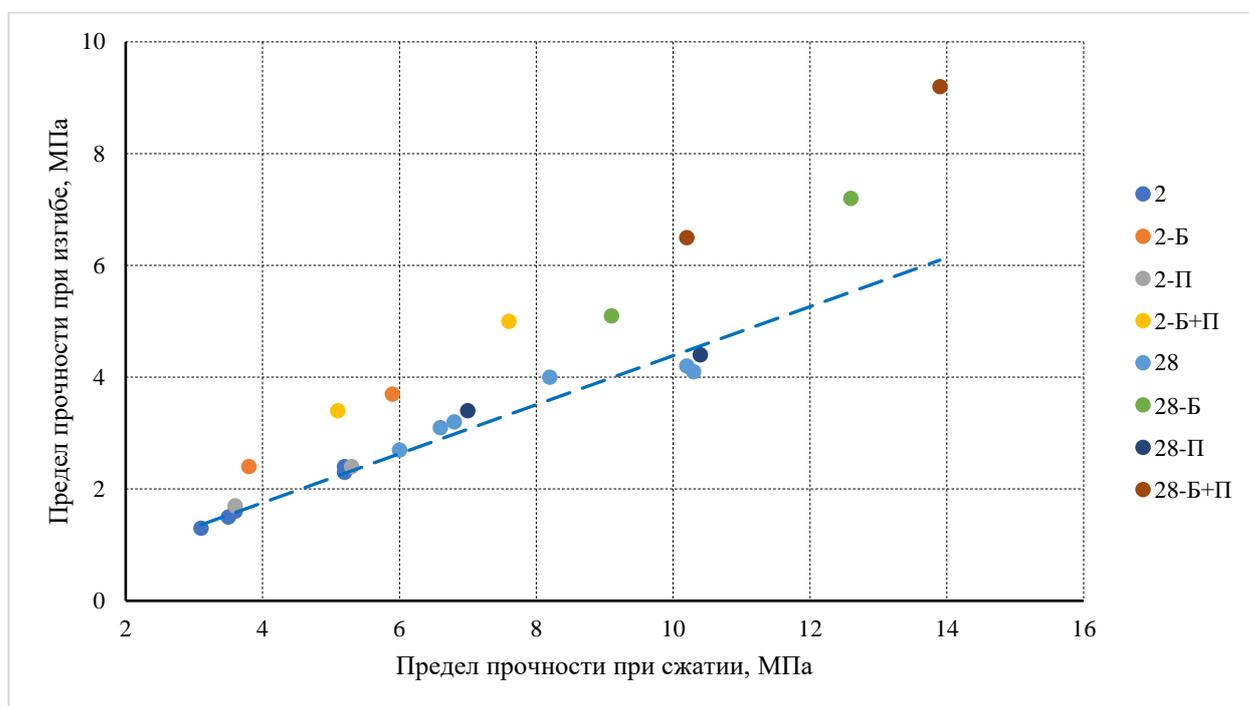


Рисунок 5.18 – Соотношение пределов прочности при изгибе R_f и сжатии R составов по таблице 5.3

2,28 – возраст соответственно 2 ч и 28 сут; Б, П, Б+П – базальтовое волокно, полипропиленовая фибра

Предел прочности при изгибе R_f составов по таблице 5.3 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.2)$$

параметры уравнения ф. (5.2) представлены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Параметры уравнения ф. (5.2)

Состав по табл. 5.3	Параметры уравнения ф.(5.2)	
	k	R^{2*}
1-3, 7-9 (без фибры)	0,44	0,99
4, 10 (базальтовые волокна Б)	0,63 / 0,57**	1,0 / 1,0
5, 11 (полипропиленовая фибра П)	0,46 / 0,44	1,0 / 0,99
6, 12 (Б+П)	0,66 / 0,65	1,0 / 1,0

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации; ** - 2 ч / 28 сут

Представленные в таблицах 5.3, 5.4 и на рисунках 5.10 – 5.18 результаты показывают, что:

- введение Д-5 в состав смеси обеспечивает рост прочности при сжатии в 28 сут до 13,3 % при (Г+ПЩ) : П = 1:2 и до 25,6 % при (Г+ПЩ):П = 1:1, в возрасте 2 ч рост незначительный, что объясняется влиянием Д-5 на формирование более плотной структуры (меньшей пористости) портландцементной составляющей вяжущего, для чего требуется длительное время;

- добавка Д-5, соотношение (Г+ПЩ) : П и возраст практически не влияют на зависимость $R_f = f(R)$ при отсутствии фибрового армирования, что закономерно, поскольку на указанную зависимость незначительно влияют рецептурные и технологические факторы;

- добавка Д-5 вызывает сокращение сроков схватывания до 25 – 29 %;

- базальтовые волокна обеспечивают рост предела прочности при изгибе относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,6 – 1,61 раза, через 28 сут в 1,6 – 1,71 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : Пм;

- полипропиленовые волокна обеспечивают рост предела прочности при изгибе относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,04 – 1,13 раза, через 28 сут в 1,05 – 1,1 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : Пм;

- полидисперсное армирование обеспечивает рост предела прочности при изгибе относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 2,17 – 2,27 раза, через 28 сут в 2,1 – 2,19 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : Пм, из чего можно сделать заключение, что продолжительность твердения мало влияет на степень эффективности дисперсного армирования;

- базальтовые волокна обеспечивают рост предела прочности при сжатии относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,09 – 1,13 раза, через 28 сут в 1,24 – 1,38 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЩ) : Пм;

- полипропиленовые волокна обеспечивают рост предела прочности при сжатии относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,02 –

1,03 раза, через 28 сут в 1,06 – 1,02 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЦ) : Пм;

- полидисперсное армирование обеспечивает рост предела прочности при сжатии относительно составов без дисперсного армирования через 2 ч в 1,46 раза, через 28 сут в 1,36 – 1,55 раза в зависимости от соотношения (Г+ПЦ) : Пм, из чего можно сделать заключение, что продолжительность твердения мало влияет на степень эффективности дисперсного армирования;

- при равной прочности при сжатии рост предела прочности при изгибе составляет до 1,05 раза при армировании полипропиленовой фиброй, 1,43 – 1,3 раза при армировании базальтовыми волокнами, 1,5 – 1,48 раза при полидисперсном армировании, причем с возрастом указанный рост прочности при изгибе снижается, из чего, во-первых, очевидна неэффективность армирования полипропиленовой фиброй для повышения прочности при изгибе, во-вторых, очевидно, что вид АМД (пепел либо пемза) практически не влияет на эффективность дисперсного армирования;

- разработанные огнезащитные штукатурные растворы с вулканическим пеплом и пемзой соответствуют требованиям ГОСТ 28013–98.

5.2. Составы и свойства теплоогнезащитных штукатурных растворов на основе вспученного вермикулита, вулканического пепла и пемзы

На первом этапе исследовано влияние таких рецептурных факторов, как Г : В (фракция 0–2,5 мм) : ПЦ : Д-5 на основные строительные-технические свойства огнезащитного раствора. Из смеси подвижностью по погружению конуса 10 см (P_k 3) вермикулитового раствора на основе комбинированного вяжущего изготавливались образцы размерами 40x40x160 мм. Образцы хранились в воздушно-сухих условиях. свойства растворов определялись по ГОСТ 23789–2018. Средняя плотность исследованных растворов в момент испытаний составляла 460 – 700 кг/м³, влажность в 28 сут составляла 4,1 – 7,0 %, Полученные результаты представлены в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Составы и свойства штукатурных растворов с вермикулитом

№ №	(Г+ПЦ) : В*	ПЦ, % в вяжущем по массе	Д-5 в % от массы вяжущего	Сроки схватывания, мин		Предел прочности, МПа			
						R_f^1		R^2	
				в возрасте				2 ч	28 сут
				начало	конец				
1	1:2	–	–	6,2	17,4	1,1	1,1	1,4	2,2
2			2	5,1	15,3	0,8	1,1	1,3	1,8
3			3	4,0	12,2	0,6	1,1	1,1	1,6
4		20	–	6,3	16,1	0,6	1,4	1,2	2,6
5			2	5,5	13,1	0,4	1,2	1,0	1,9
6			3	5,1	11,2	0,4	1,1	0,9	1,7
7	1:3	–	–	8,3	17,2	0,4	0,8	0,8	1,3
8			2	7,5	15,1	0,4	0,7	0,8	1,3
9			3	7,1	14,4	0,4	0,7	0,7	1,2
10		20	–	8,3	16,5	0,3	0,5	0,7	1,7
11			2	7,1	14,4	0,3	0,5	0,7	1,6
12			3	6,6	14,2	0,3	0,4	0,7	1,5

Примечание: * – по объему; 1 – при изгибе; 2 – при сжатии

В таблице 5.5 не отражены данные о повышении коэффициента размягчения композиционного вяжущего с 0,45 до 0,68 у составов с ПЦ и Д-5.

Пределы прочности составов по таблице 5.5 представлены на рисунках 5.19 и 5.20.

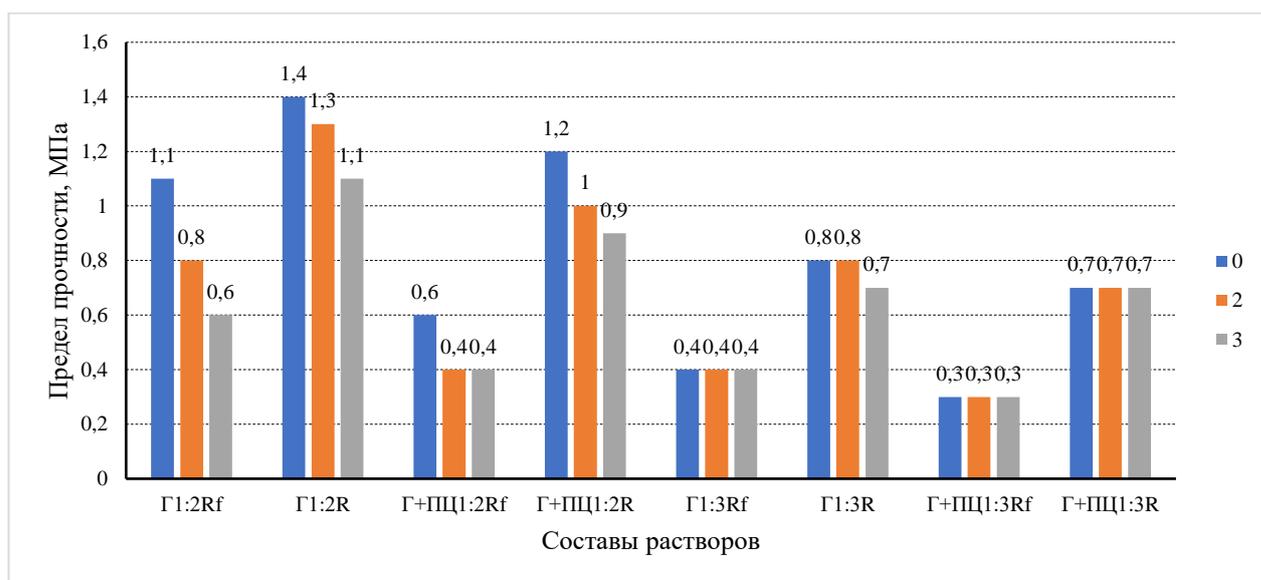


Рисунок 5.19 – Пределы прочности составов по таблице 5.5 в возрасте 2 ч

0 – 3 – дозировка Д-5, %; R_f – при изгибе, R – при сжатии;

1:2, 1:3 – соотношение вяжущее/вермикулит

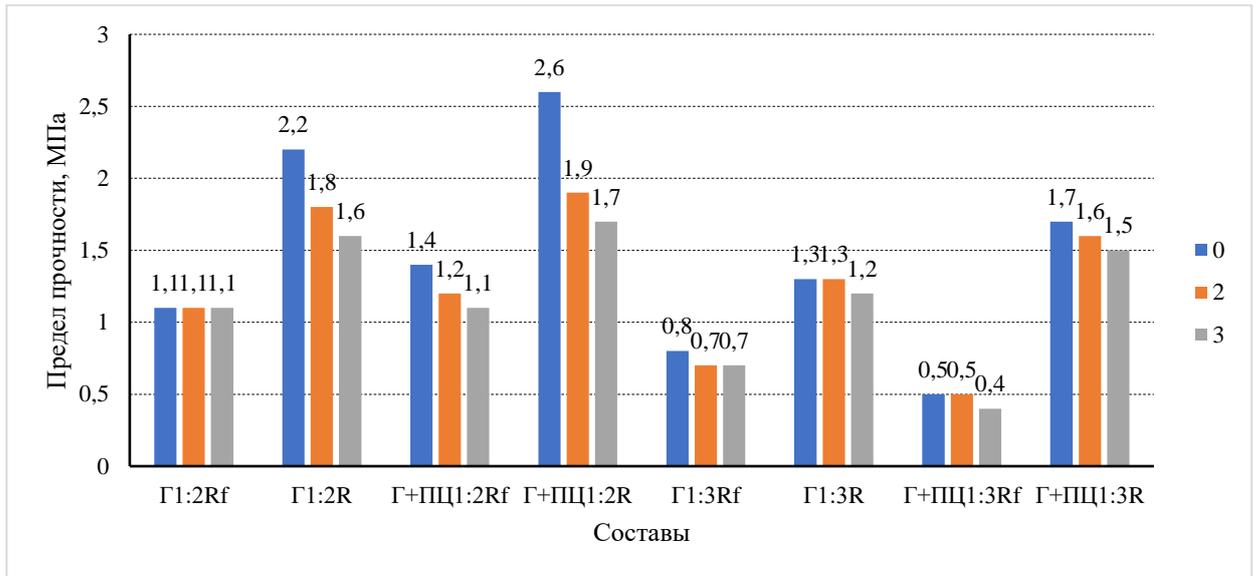


Рисунок 5.20 – Пределы прочности составов по таблице 5.5 в возрасте 28 сут
 0 – 3 – дозировка Д-5, %; R_f – при изгибе, R – при сжатии;
 1:2, 1:3 – соотношение вяжущее/вермикулит

На рисунке 5.21 представлено соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.5.

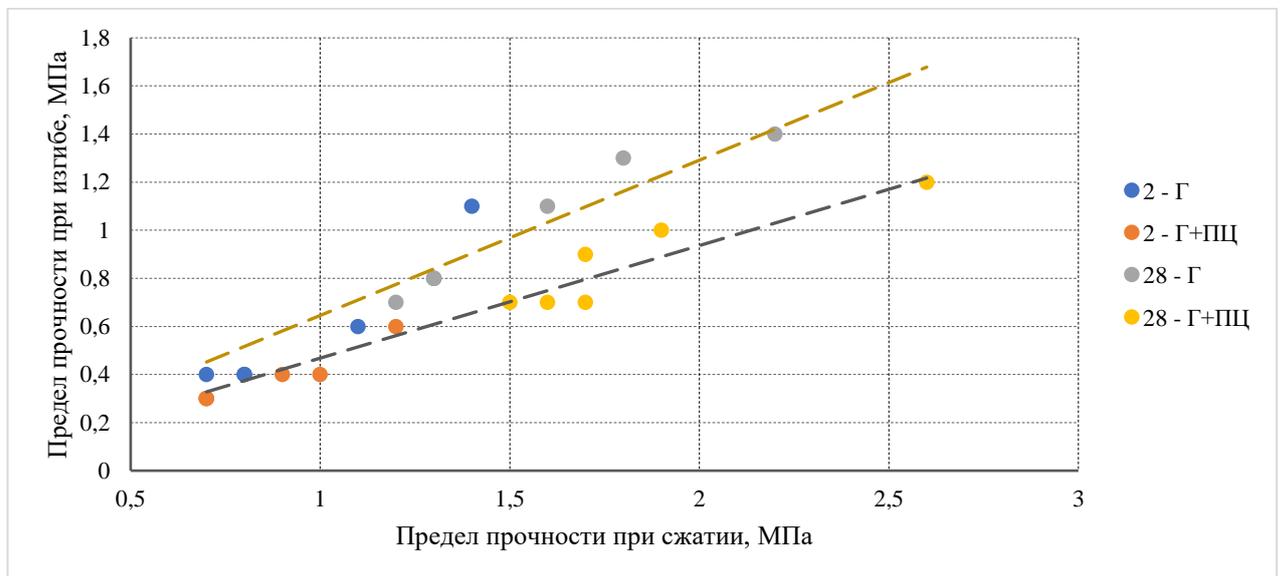


Рисунок 5.21 – Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.5

Предел прочности при изгибе R_f растворов по таблице 5.5 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.3)$$

параметры уравнения ф. (5.3) представлены в таблице 5.6.

Таблица 5.6 – Параметры уравнения ф. (5.3)

Состав по табл. 5.5	Параметры уравнения ф.(5.3)	
	k	R ^{2*}
1-3, 7-9 (Г)	0,63 / 0,65	0,97 / 0,99
4-6, 10-12 (Г+ПЦ)	0,45 / 0,47**	0,99 / 0,99
1-3, 7-9 (Г)	0,65	0,99
4-6, 10-12 (Г+ПЦ)	0,47	0,99

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации; ** - 2 ч / 28 сут

Представленные в таблицах 5.5, 5.6 и на рисунках 5.19 – 5.21 результаты показывают, что:

- применение добавки Д-5 для строительных растворов на вермикулите ускоряют сроки схватывания смесей от 14 до 31 %, во-вторых, Д-5 негативно влияет на прочностные показатели, вызывая в проектном возрасте снижение предела прочности при сжатии до 35 %;

- соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии практически не зависит от возраста раствора, наличия Д-5 и соотношения вяжущее/вермикулит;

- при равной прочности при сжатии предел прочности при изгибе растворов на строительном гипсе выше до 1,38 раза, что ставит под сомнение целесообразность применения комбинированного вяжущего Г+ПЦ, за исключением ситуаций с повышенными требованиями по водостойкости.

На втором этапе с целью снижения себестоимости раствора изучена целесообразность замены части вермикулита фракции 0-0,315 мм из фракций 0–2,5 мм вулканическим пеплом (П) фракции 0-0,315 мм. Составы и полученные результаты представлены в таблице 5.7.

Таблица 5.7 – Состав и свойства штукатурного раствора с вулканическим пеплом

№ №	(Г+ПЩ) : (В+П)*	ПЩ, % в вяжу- щем	Д-5, % от массы вя- жущего	Средняя плот- ность, кг/м ³	Предел прочности, МПа			
					R _f ¹		R ²	
					в возрасте			
					2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	1:2	–	–	580	0,5	0,8	1,0	1,2
2			2	630	0,5	1,1	1,1	1,6
3			3	670	0,6	1,2	1,3	1,7
4		20	–	680	0,3	1,2	0,7	1,6
5			2	700	0,4	1,5	0,8	2,0
6			3	710	0,4	1,5	0,9	2,3
7	1:3	–	–	510	0,3	0,6	0,4	1,0
8			2	520	0,4	0,6	0,5	1,2
9			3	550	0,4	0,7	0,6	1,4
10		20	–	560	0,3	0,5	0,4	1,2
11			2	580	0,4	0,6	0,5	1,5
12			3	590	0,4	0,6	0,5	1,6

Примечание: * – по объему; 1 – при изгибе; 2 – при сжатии

При замене части вспученного вермикулита фракции 0-0,315 мм вулканическим пеплом фракции 0-0,315 мм заметного увеличения средней плотности не происходит, она составляет от 510 до 710 кг/м³. Коэффициент размягчения раствора с комбинированным вяжущим возрастает до 0,75. Д-5 улучшает технологические свойства смеси.

На рисунке 5.22 представлена зависимость предела прочности при сжатии от средней плотности растворов.

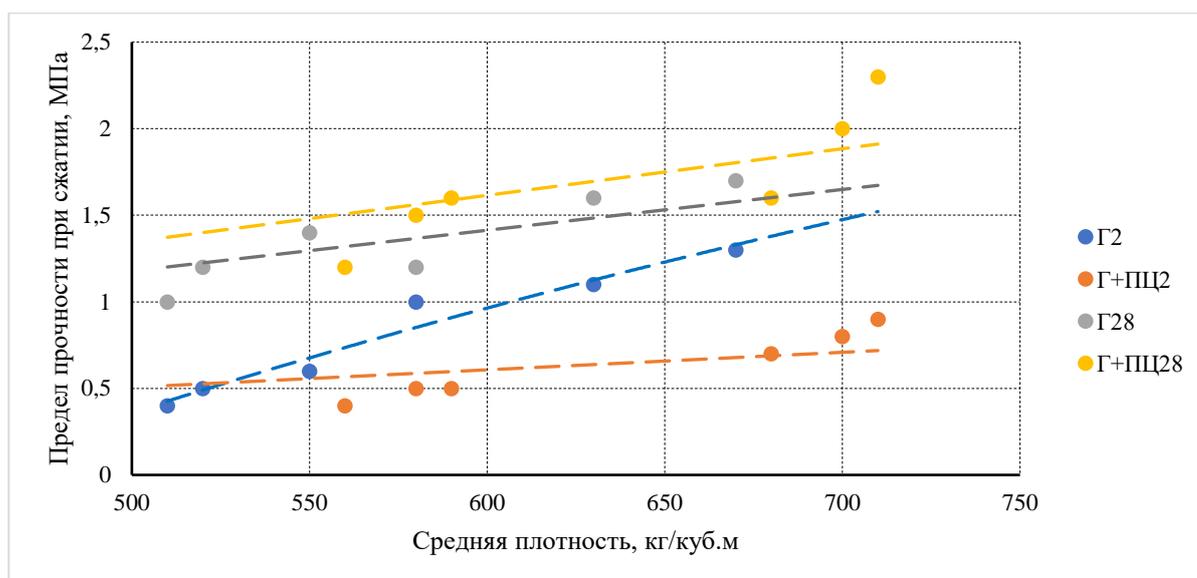


Рисунок 5.22 – Зависимость предела прочности при сжатии от средней плотности строительных растворов

Г, ПЦ – соответственно гипс строительный, портландцемент;
2, 28 – возраст 2 ч и 28 сут

Предел прочности при сжатии R растворов по таблице 5.7 в зависимости от средней плотности ρ может быть определен по уравнениям:

$$R = k\rho,$$

$$R = a \ln \rho + b \quad (5.4)$$

параметры уравнения ф. (5.4) представлены в таблице 5.8.

Таблица 5.8 – Параметры уравнения ф. (5.4)

Растворы и возраст испытаний	Параметры уравнения ф.(5.4)			
	k	a	b	R^{2*}
(Г) 2	-	3,31	-20,2	0,96
(Г+ПЦ) 2	0,001	-	-	0,97
(Г) 28	0,0024	-	-	0,99
(Г+ПЦ) 28	0,0027	-	-	0,98

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации;

На рисунке 5.23 представлена зависимость предела прочности при сжатии растворов от величины полной пористости.

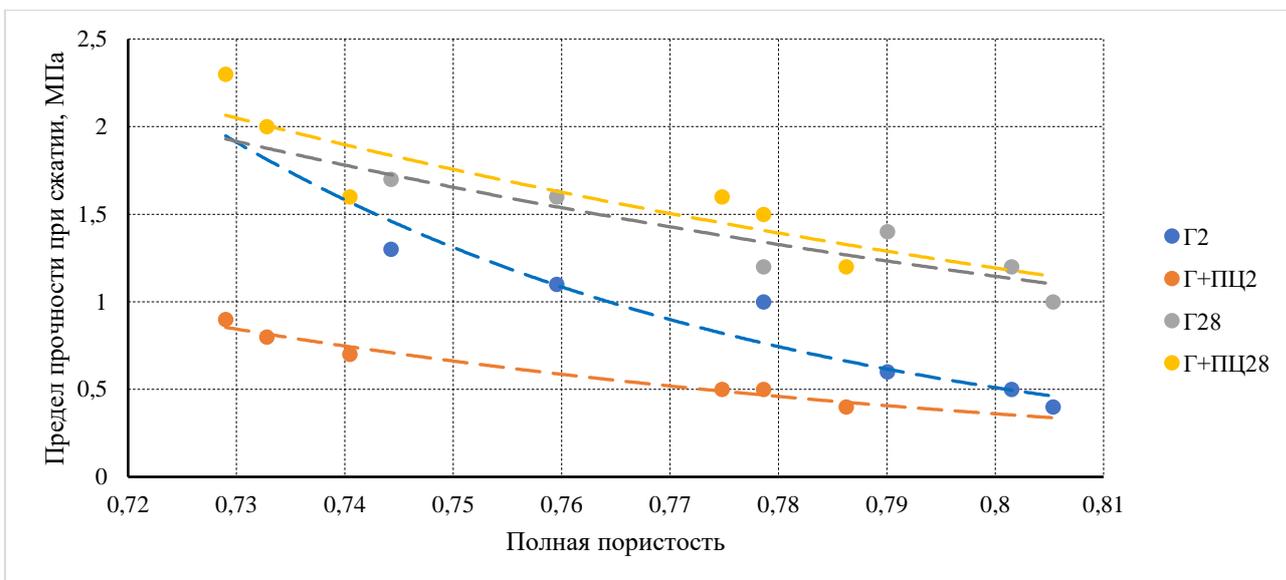


Рисунок 5.23 – Зависимость предела прочности при сжатии от расчетного значения полной пористости

Г, ПЦ – соответственно гипс строительный, портландцемент;
2, 28 – возраст 2 ч и 28 сут

Предел прочности при сжатии R растворов по таблице 5.7 в зависимости от расчетной полной пористости P может быть определен по уравнениям:

$$R = R_0 \exp(kP) \quad (5.5)$$

параметры уравнения ф. (5.5) представлены в таблице 5.9.

Таблица 5.9 – Параметры уравнения ф. (5.5)

Растворы и возраст испытаний	Параметры уравнения ф.(5.5)		
	k	R_0	R^{2*}
(Г) 2	-18,87	$2 \cdot 10^6$	0,89
(Г+ПЦ) 2	-12,18	6034	0,97
(Г) 28	-7,35	409	0,81
(Г+ПЦ) 28	-7,73	577	0,76

Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии растворов представлено на рисунке 5.24.

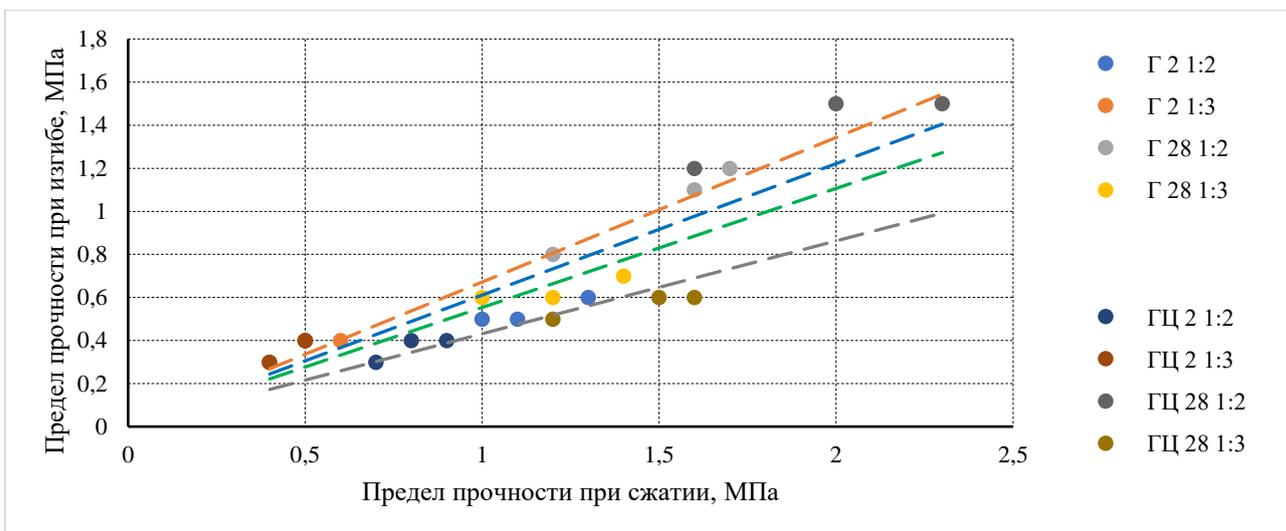


Рисунок 5.24 – Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии

Г, Ц – соответственно гипс строительный и ПЦ;

1:2, 1:3 – соотношение вяжущее/вермикулит+пепел; 2,28 – возраст 2 ч и 28 сут

Предел прочности при изгибе R_f составов по таблице 5.7 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.6)$$

параметры уравнения ф. (5.6) представлены в таблице 5.10.

Таблица 5.10 – Параметры уравнения ф. (5.6)

Состав по табл. 5.7	Параметры уравнения ф.(5.8)	
	k	R^{2*}
Г, Г:П = 1:2	0,61 (1,0)**	0,97
Г, Г:П = 1:3	0,55 (0,9)**	0,98
Г+ПЦ, Г:П = 1:2	0,67 (1,0)**	0,98
Г+ПЦ, Г:П = 1:3	0,43 (0,64)**	0,93

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации; ** относительно

Г:П = 1:2

Представленные в таблицах 5.7 – 5.8 и на рисунках 5.22 – 5.24 результаты показывают, что:

- применение добавки Д-5 для строительных растворов с вулканическим пеплом обеспечивает повышение предела прочности при сжатии в проектном возрасте на 33 – 44 %;

- соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии практически не зависит от возраста раствора и наличия Д-5, в растворах на гипсе при соотношении вяжущее : пепел = 1:2 при равной прочности при сжатии предел прочности при изгибе повышается до 11 % в сравнении с растворами с соотношением 1:3, а в растворах на Г+ПЦ до 55 %;

- с увеличением полной пористости (снижением средней плотности) предел прочности растворов закономерно снижается, при этом наиболее быстрое снижение прочности имеет место у растворов на гипсе через 2 ч твердения, в проектном возрасте снижение прочности растворов на гипсе и комбинированном вяжущем с увеличением полной пористости (снижением средней плотности) протекает практически одинаково.

На третьем этапе произведена оценка целесообразности для снижения себестоимости строительного раствора замены части вермикулита фракции 0-0,315 мм из фракций 0–2,5 мм вулканической пемзой фракции 0–0,315 мм (таблица 5.11).

Таблица 5.11 – Состав и свойства штукатурного раствора с вулканической пемзой

№ №	(Г+ПЦ) : (В+ПМ)*	ПЦ, % в вяжу- щем	Д-5, % от массы вя- жущего	ρ, кг/м ³	Предел прочности, МПа			
					R _t ¹		R ²	
					в возрасте			
					2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	1:2	–	–	530	0,4	0,7	0,8	1,0
2			2	580	0,4	1,0	0,9	1,4
3			3	620	0,5	1,1	1,2	1,6
4		20	–	630	0,3	1,1	0,6	1,5
5			2	650	0,4	1,4	0,7	1,9
6			3	660	0,4	1,4	0,8	2,2
7	1:3	–	–	470	0,2	0,5	0,4	0,9
8			2	480	0,3	0,5	0,5	1,1
9			3	510	0,3	0,6	0,6	1,3
10		20	–	520	0,3	0,5	0,4	1,1
11			2	540	0,4	0,6	0,5	1,4
12			3	550	0,4	0,6	0,5	1,5

Примечание: * – по объему; 1 – при изгибе; 2 – при сжатии

На рисунке 5.25 представлена зависимость предела прочности при сжатии строительных растворов по таблице 5.11 от средней плотности.

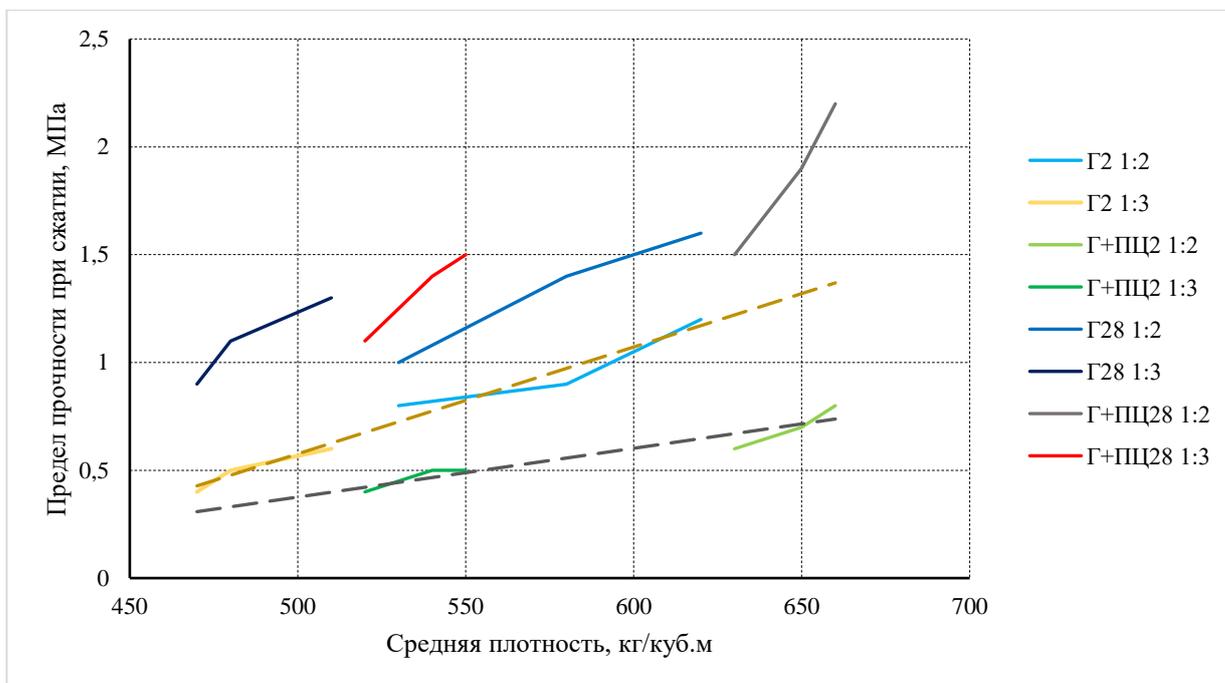


Рисунок 5.25 – Зависимость предела прочности при сжатии от средней плотности строительных растворов

Г, ПЦ – соответственно гипс строительный, портландцемент;

2, 28 – возраст 2 ч и 28 сут; 1:2, 1:3 соотношение вяжущее/ вермикулит + пемза

Предел прочности при сжатии R растворов по таблице 5.11 линейно зависит от средней плотности ρ с учетом рецептурных особенностей и может быть определен по уравнениям:

$$R = a\rho + b \quad (5.7)$$

параметры уравнения ф. (5.7) представлены в таблице 5.12.

Таблица 5.12 – Параметры уравнения ф. (5.7)

Растворы и возраст испытаний	Параметры уравнения ф.(5.7)		
	a	b	R^{2*}
(Г) 2 1:2	0,0043	-1,54	0,89
(Г) 2 1:3	0,0046	-1,746	0,92
(Г+ПЦ) 2 1:2	0,0064	-3,46	0,96
(Г+ПЦ) 2 1:3	0,0036	-1,45	0,89
(Г) 28 1:2	0,0067	-2,54	0,98
(Г) 28 1:3	0,0092	-3,39	0,92
(Г+ПЦ) 28 1:2	0,0229	-12,9	0,99
(Г+ПЦ) 28 1:3	0,0136	-5,95	0,99
(Г) 2	0,005	-1,9	0,97
(Г+ПЦ) 2	0,0023	-0,755	0,90

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации;

На рисунке 5.26 представлена зависимость предела прочности при сжатии растворов по таблице 5.11 от величины полной пористости.

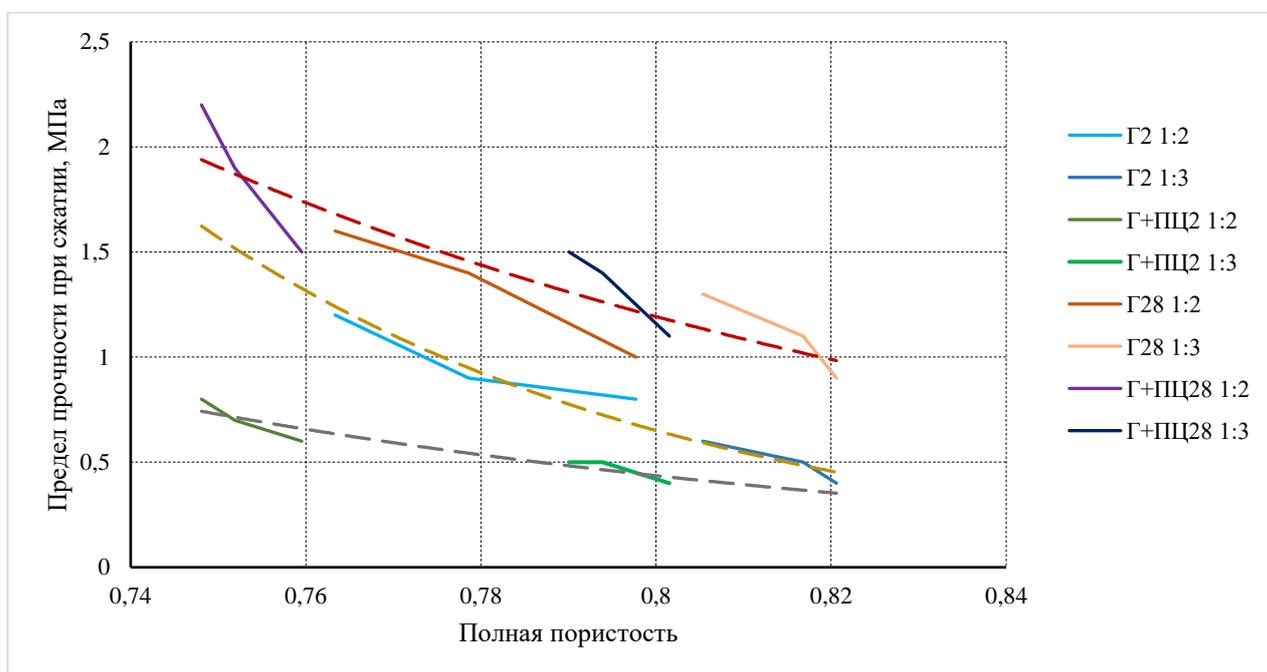


Рисунок 5.26 – Зависимость предела прочности при сжатии от расчетного значения полной пористости

Г, ПЦ – соответственно гипс строительный, портландцемент; 2, 28 – возраст 2 ч и 28 сут; 1:2, 1:3 соотношение вяжущее/ вермикулит + пемза

Предел прочности при сжатии R растворов по таблице 5.11 в зависимости от расчетной полной пористости P может быть определен по уравнению:

$$R = R_0 \exp(kP) \quad (5.8)$$

параметры уравнения ф. (5.8) представлены в таблице 5.13.

Таблица 5.13 – Параметры уравнения ф. (5.8)

Растворы и возраст испытаний	Параметры уравнения ф.(5.8)		
	k	R_0	R^{2*}
(Г) 2	-17,6	$0,849 \cdot 10^6$	0,95
(Г+ПЦ) 2	-10,28	1599	0,91
(Г) 28; (Г+ПЦ) 28	-9,36	2137	0,81

Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.11 представлено на рисунке 5.27.

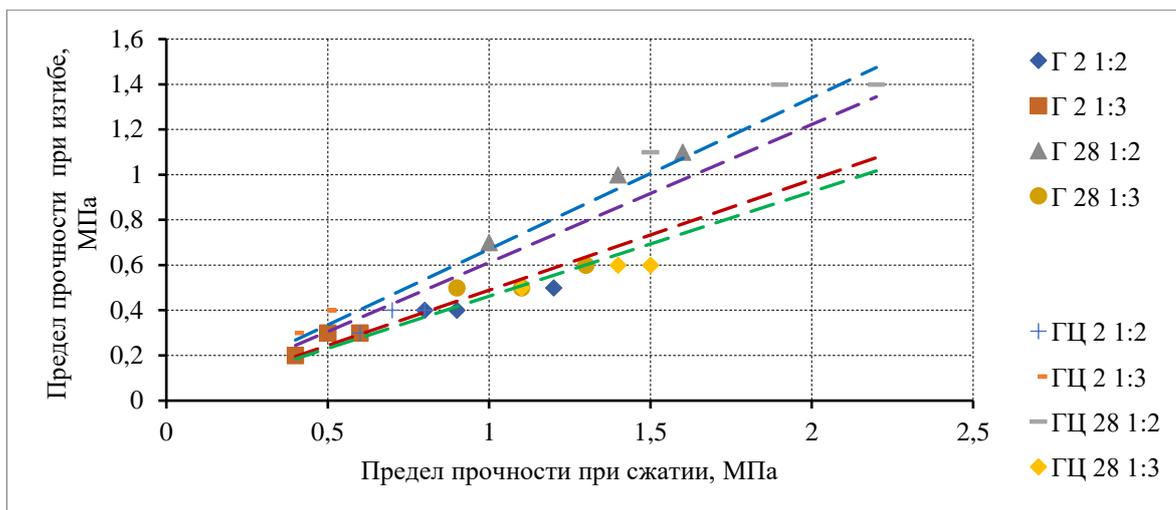


Рисунок 5.27 - Соотношение пределов прочности при изгибе и сжатии Г, Ц – соответственно гипс строительный и ПЦ; 1:2, 1:3 – соотношение вяжущее/ вермикулит + пемза; 2,28 – возраст 2 ч и 28 сут

Предел прочности при изгибе R_f составов по таблице 5.11 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.9)$$

параметры уравнения ф. (5.9) представлены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Параметры уравнения ф. (5.9)

Состав по табл. 5.9	Параметры уравнения ф.(5.9)	
	k	R^{2*}
Г, Г:Пм = 1:2	0,61	0,96
Г, Г:Пм = 1:3	0,49	0,99
Г+ПЦ, Г:Пм = 1:2	0,67	0,99
Г+ПЦ, Г:Пм = 1:3	0,46	0,94

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации

Представленные в таблицах 5.11 – 5.12 и на рисунках 5.25 – 5.27 результаты показывают, что:

- применение добавки Д-5 для строительных растворов с вспученным вермикулитом и вулканической пемзой обеспечивает повышение предела прочности при сжатии в проектном возрасте на 33 – 60 %;

- соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии практически не зависит от возраста раствора и наличия Д-5, в растворах на гипсе при соотношении по объему вяжущее : вспученный вермикулит+пепел = 1:2 при равной

прочности при сжатии предел прочности при изгибе повышается до 24 % в сравнении с растворами с соотношением 1:3, а в растворах на Г+ПЦ до 46 %;

- с увеличением полной пористости (снижением средней плотности) предел прочности растворов закономерно снижается, при этом наблюдается явно выраженное влияние рецептурных факторов на кинетику, причем снижение прочности происходит быстрее, чем можно было ожидать из анализа, например, формулы Бальшина:

$$R_p = R_0 \exp(-kP), \quad (5.10)$$

R_p, R_0 – соответственно значение прочности при некоторой величине пористости P , значение прочности при «нулевой пористости», k – коэффициент, равный, по некоторым данным, 4,84...5,15 [174].

На четвертом этапе изучены свойства штукатурных растворов с вулканическим пеплом фракции 0 – 0,315 мм, вспученным вермикулитом фракции 0,315 – 2,5 мм и дисперсным армированием (таблица 5.15). Доля ПЦ в составе вяжущего принята 20 %. Дозировка Д-5 принята 2 % от массы вяжущего. Средняя плотность растворов в проектном возрасте 700 кг/м³ при соотношении (Г+ПЦ) : (В+П) = 1:2 и 540 кг/м³ при соотношении (Г+ПЦ) : (В+П) = 1:3.

Таблица 5.15 – Составы и свойства штукатурного раствора с вулканическим пеплом и дисперсным армированием

№	(Г+ПЦ) : (В+П)*	Волокно, % *		Предел прочности, МПа			
		Б	ПП	R_f^1		R^2	
				в возрасте			
				2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	1:2	–	–	0,4	1,5	0,8	2,0
2		1,3	-	0,7	1,8	1,4	2,4
3		-	1,2	0,5	1,6	0,9	2,1
4		1,3	1,2	0,9	2,1	1,8	2,8
5	1:3	–	–	0,4	0,6	0,5	1,4
6		1,3	-	0,7	0,73	0,9	1,7
7		-	1,2	0,6	0,7	0,6	1,5
8		1,3	1,2	0,9	0,9	1,1	2,0

Примечание: * – по объему; 1 – при изгибе; 2 – при сжатии; Б – базальтовое; ПП - полипропиленовое

На рисунке 5.28 представлены пределы прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.15 в возрасте 2 ч, а на рис. 5.29 – в возрасте 28 сут.

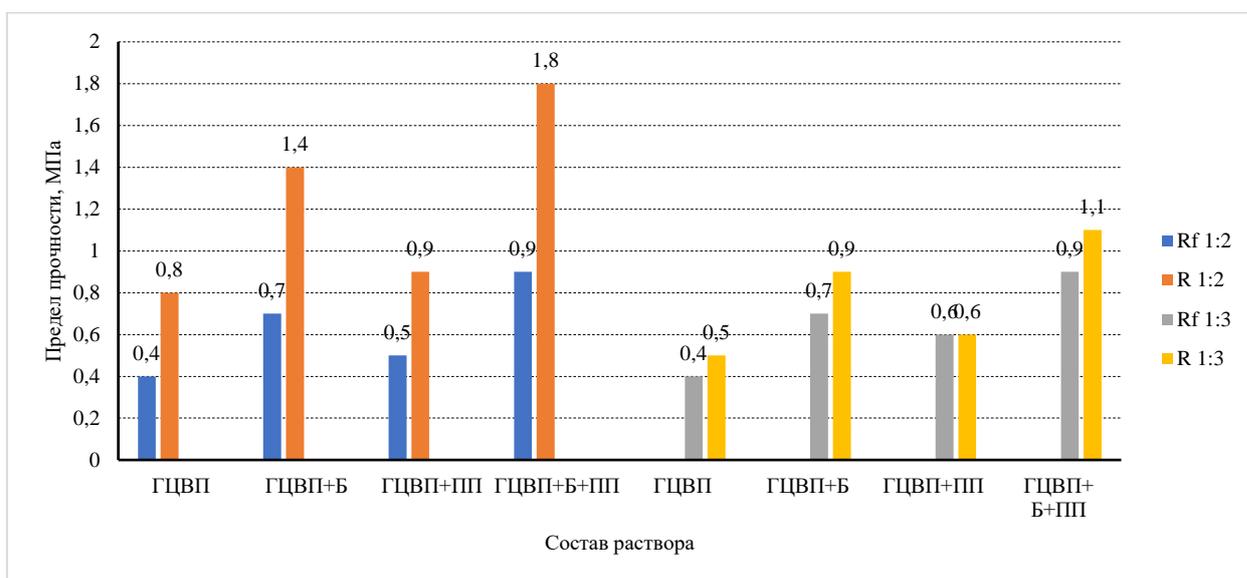


Рисунок 5.28 – Пределы прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.15 в возрасте 2 ч

ГЦВП – гипс+ПЦ+вермикулит+пепел; ПП – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+П)

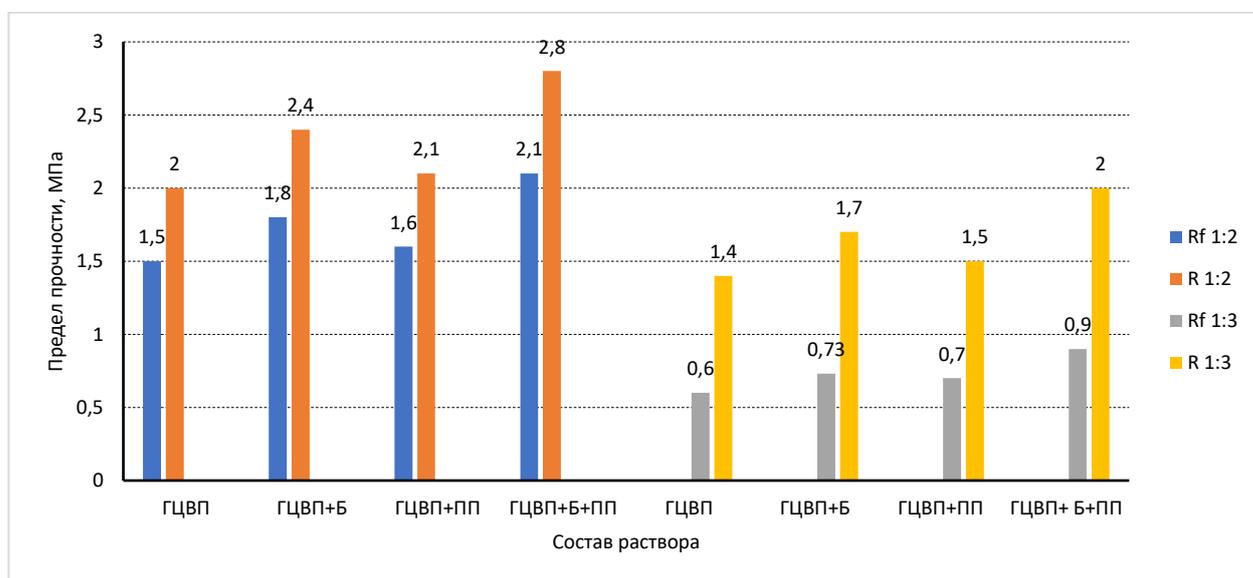


Рисунок 5.29 – Пределы прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.15 в возрасте 28 сут

ГЦВП – гипс+ПЦ+вермикулит+пепел; ПП – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+П)

На рисунке 5.30 представлены значения пределов прочности при изгибе и сжатии дисперсно-армированных растворов относительно неармированных составов № 1 и 5 по таблице 5.15.

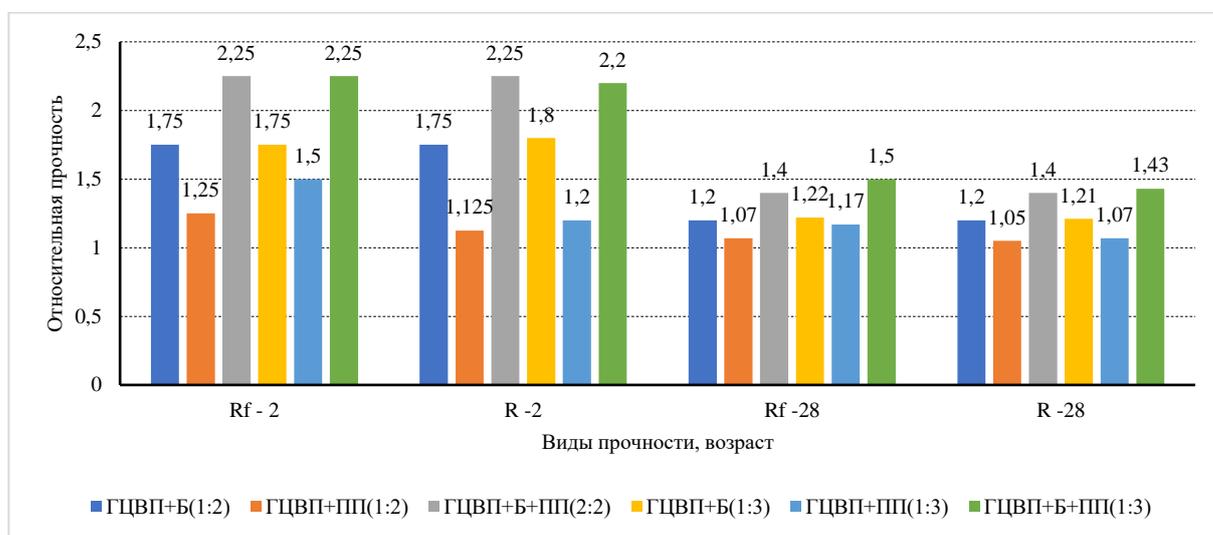


Рисунок 5.30 – Относительная прочность дисперсно-армированных растворов относительно неармированных составов № 1 и 5 по таблице 5.15

ГЦВП – гипс+ПЦ+вермикулит+пепел; ПП – полипропиленовая фибра;
Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+П)

На рисунке 5.31 приведено соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии растворов по таблице 5.15.

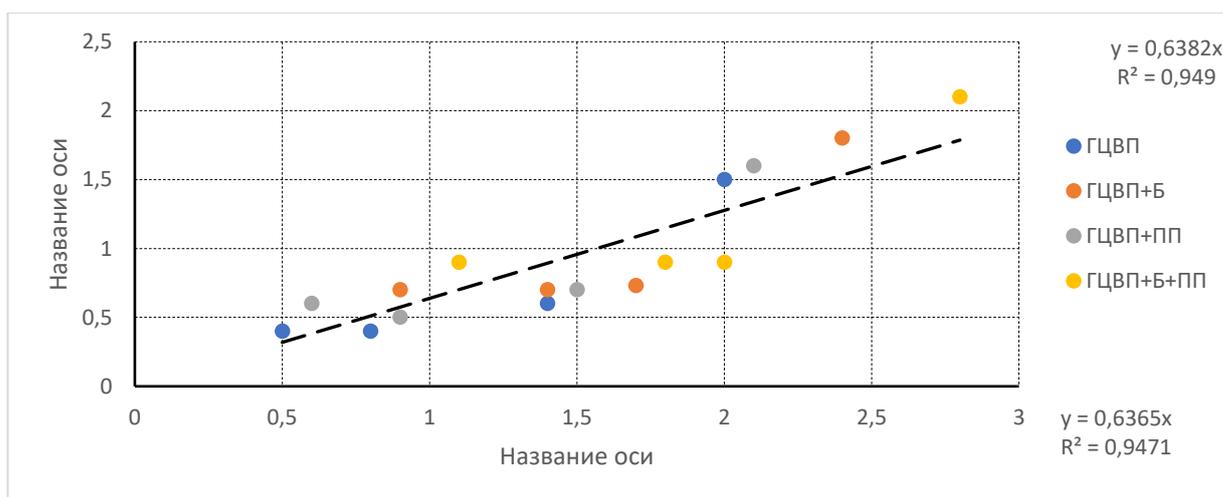


Рисунок 5.31 – Соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии растворов по таблице 5.15

ГЦВП – гипс+ПЦ+вермикулит+пепел; ПП – полипропиленовая фибра;
Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+П)

Предел прочности при изгибе R_f растворов по таблице 5.15 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.11)$$

параметры уравнения ф. (5.11) представлены в таблице 5.16.

Таблица 5.16 – Параметры уравнения ф. (5.11)

Состав по табл. 5.13	Параметры уравнения ф.(5.11)	
	k	R^{2*}
ГЦП	0,64	0,95
ГЦП+Б (ПП) (Б+ПП)	0,64	0,95

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации

Представленные в таблицах 5.15, 5.16 и на рисунках 5.28 – 5.31 результаты показывают, что:

- дисперсное армирование в зависимости от вида волокон, возраста раствора и соотношения вяжущее/вермикулит+пепел повышает предел прочности при сжатии от 1,05 до 2,25 раза, а при изгибе от 1,07 до 2,25 раза, при этом наименьшие показатели имеют место при использовании полипропиленовых волокон, а наибольшие – при полидисперсном фибровом армировании;

- соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии $R_f = f(R)$ с достаточной для практических целей точностью не зависит от возраста раствора и рецептурных факторов, в т.ч. от параметров дисперсного армирования.

На пятом этапе получены результаты исследований строительных растворов с вулканической пемзой фракции 0 – 0,315 мм, вспученным вермикулитом фракции 0,315 – 2,5 мм и добавкой Д-5 с дозировкой 2 % от массы вяжущего, представленные в таблице 5.17. Средняя плотность исследованных растворов в проектном возрасте при соотношении (Г+ПЩ) : (В+Пм)= 1:2 650 кг/м³ (№1-4 в табл. 5.17), при соотношении (Г+ПЩ) : (В+Пм) = 1:3 480 кг/м³ (№5-8 в таблице 5.17), т.е. несколько ниже, чем растворов с вулканическим пеплом. В составе вяжущего Г+ПЩ доля ПЩ 20 %.

Таблица 5.17 – Составы и свойства штукатурного раствора с вулканической пемзой и дисперсным армированием

№	(Г+ПЦ) : (В+Пм)*	Волокно, % *		Предел прочности, МПа			
		Б	ПП	R _f ¹		R ²	
				в возрасте			
				2 ч	28 сут	2 ч	28 сут
1	1:2	–	–	0,3	1,4	0,7	1,8
2		1,3	-	0,6	1,7	1,3	2,3
3		-	1,2	0,4	1,5	0,8	1,9
4		1,3	1,2	0,8	2,0	1,7	2,6
5	1:3	–	–	0,3	0,5	0,4	1,3
6		1,3	-	0,6	0,6	0,8	1,6
7		-	1,2	0,5	0,5	0,7	1,54
8		1,3	1,2	0,8	0,8	1,0	1,9

Примечание: * – по объему; 1 – при изгибе; 2 – при сжатии; Б – базальтовое; ПП – полипропиленовое

На рисунках 5.32 и 5.33 представлены значения пределов прочности при изгибе и сжатии в возрасте 2 ч и 28 сут растворов по таблице 5.17.

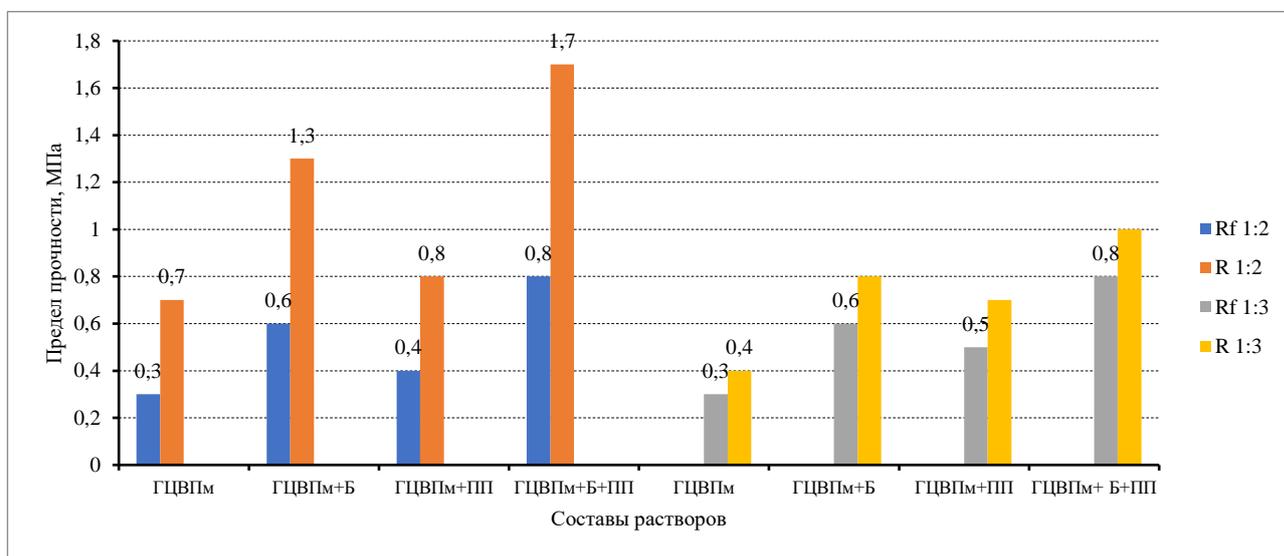


Рисунок 5.32 – Пределы прочности при изгибе и сжатии растворов по таблице 5.17 в возрасте 2 ч

R_f, R – соответственно при изгибе и при сжатии;

ГЦВПм – гипс+ПЦ+вермикулит+пемза; ПП – полипропиленовая фибра;

Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+Пм)

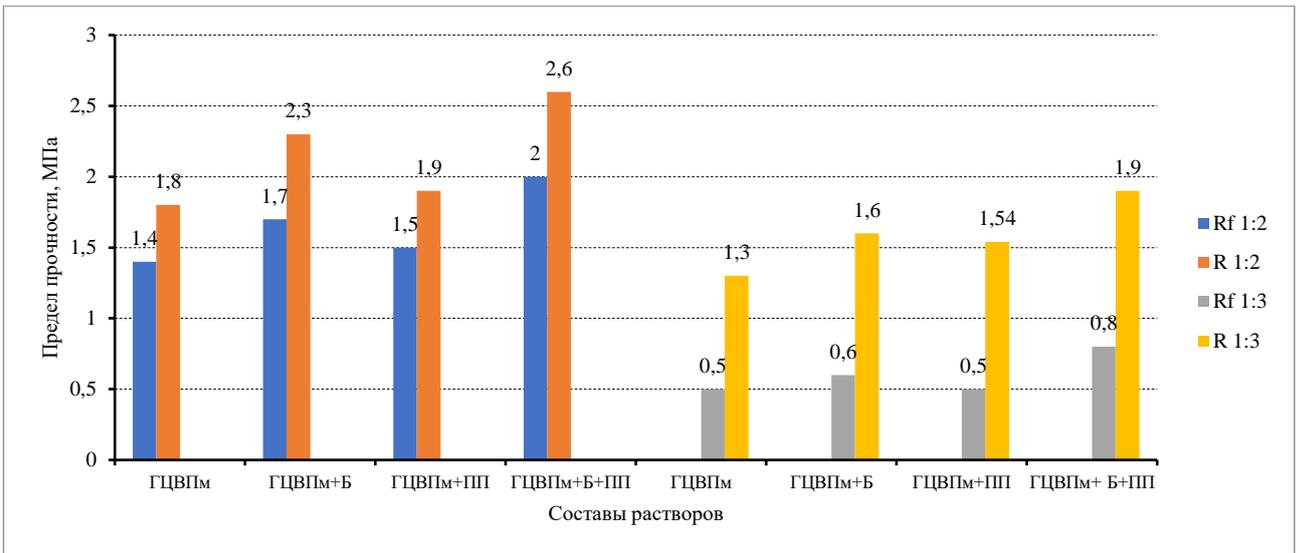


Рисунок 5.33 – Пределы прочности при изгибе и сжатии растворов

по таблице 5.17 в возрасте 28 сут

R_f , R – соответственно при изгибе и при сжатии;

ГЦВПм – гипс+ПЦ+вермикулит+пемза; ПП – полипропиленовая фибра;

Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+Пм)

На рисунке 5.34 представлены значения пределов прочности при изгибе и сжатии дисперсно-армированных растворов относительно неармированных составов № 1 и 5 по таблице 5.17.

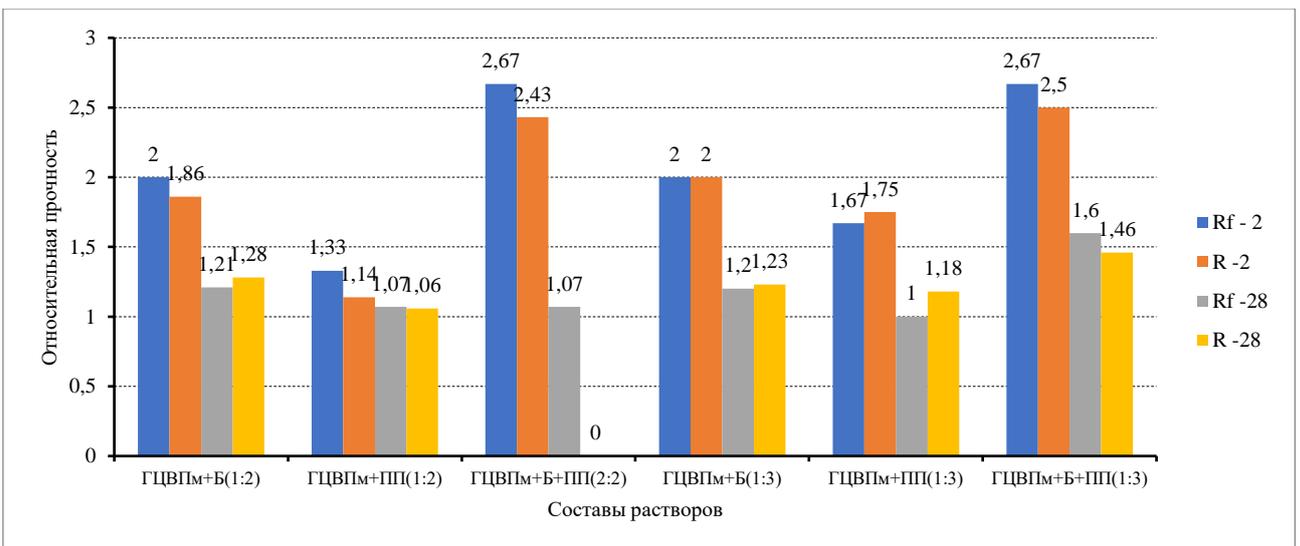


Рисунок 5.34 – Относительная прочность дисперсно-армированных растворов

относительно неармированных составов № 1 и 5 по таблице 5.17

ГЦВПм – гипс+ПЦ+вермикулит+пемза; ПП – полипропиленовая фибра; Б – ба-

зальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+Пм)

На рисунке 5.35 приведено соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии растворов по таблице 5.17.

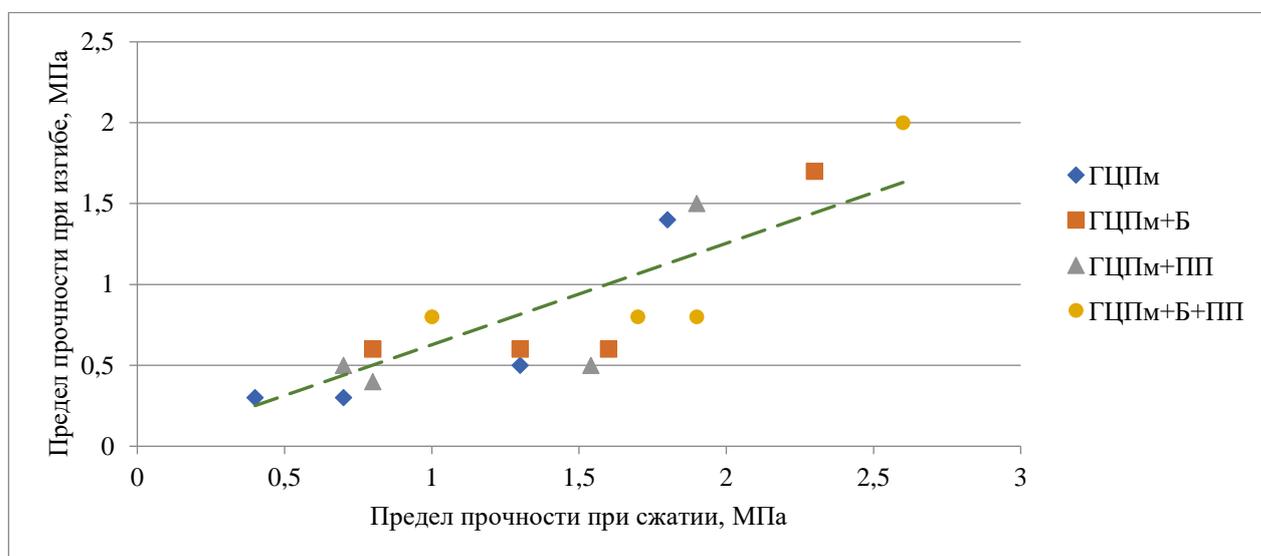


Рисунок 5.35 – Соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии растворов по таблице 5.17

ГЦВПм – гипс+ПЦ+вермикулит+пемза; ПП – полипропиленовая фибра; Б – базальтовое волокно; 1:2, 1:3 – соотношение (Г+ПЦ) : (В+Пм)

Предел прочности при изгибе R_f растворов по таблице 5.17 линейно зависит от предела прочности при сжатии R :

$$R_f = kR, \quad (5.12)$$

параметры уравнения ф. (5.12) представлены в таблице 5.17.

Таблица 5.18 – Параметры уравнения ф. (5.12)

Состав по табл. 5.17	Параметры уравнения ф.(5.12)	
	k	R^{2*}
ГЦП	0,63	0,92
ГЦП+Б (ПП) (Б+ПП)	0,61	0,92

Примечание: * - показатель достоверности аппроксимации

Представленные в таблицах 5.17, 5.18 и на рисунках 5.32 – 5.35 результаты показывают, что:

- дисперсное армирование в зависимости от вида волокон, возраста раствора и соотношения вяжущее/пемза повышает предел прочности при сжатии от 1,06 до 2,43 раза, а при изгибе от 1,0 до 2,67 раза, при этом наименьшие показатели имеют место при использовании полипропиленовых волокон, а наибольшие – при полидисперсном фибровом армировании;

- соотношение пределов прочности при изгибе и при сжатии $R_f = f(R)$ с достаточной для практических целей точностью не зависит от возраста раствора и рецептурных факторов, в т.ч. от параметров дисперсного армирования, и практически не отличается от полученных для растворов на вулканическом пепле результатов.

5.3. Техничко-экономическая эффективность использования штукатурных растворов на основе вспученного вермикулита, вулканического пепла и пемзы

Выполняем экономическое сравнение 1 м² огнезащитной штукатурки толщиной 20 мм по стоимости материалов на комбинированном вяжущем с применением вспученного вермикулита, вулканических пепла и пемзы.

Стоимость материалов определяем по отпускной цене завода-изготовителя, вулканического пепла и пемзы по отпускной цене карьера (таблица 5.19).

Таблица 5.19 – Наименование материала, завод-изготовитель и стоимость материала

Наименование материала	Завод-изготовитель	Стоимость 1 кг материала, руб
Гипс строительный марки Г-5 БП	АО Усть-Джегутинский гипсовый комбинат, Карачаево-Черкесская Республика	5,0
Портландцемент М500 Д0 (ЦЕМ I 42,5Н)	АО «Белгородский цемент»	9,6
Вспученный вермикулит	«Санкт-Петербургская слюдяная фабрика», г. Колпино	96,0
Вулканическая пемза	Вулканическая пемза Псыхурейского месторождения, Кабардино-Балкарская Республика	1,25
Вулканический пепел	Вулканический пепел Заюковского карьера, Кабардино-Балкарская Республика	1,25
Полифункциональная добавка Д-5	ООО НПП «Токар», г. Владикавказ	135,0

Базальтовые волокна марки РНБ-9-1200-4с	АО «Ивотстекло», г. Брянск	400
Полипропиленовые фибры RS	ООО «Руссеал», г. Санкт-Петербург	180

По результатам исследований определяем расход материалов на 1 м³ огнезащитной штукатурки различных составов (таблица 5.20).

Таблица 5.20 – Расход материалов на 1 м³ огнезащитного штукатурного раствора

№№ вариантов	Вид раствора	Средняя плотность ρ , кг/м ³	Расход материала, кг							
			гипс	цемент	вермикулит	пепел	пемза	волокно		Д-5
								базальтовое	полипропиленовое	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Гипсоцементно-вермикулитовый раствор, пепел фракции 0–0,16 мм (эталон)	480	154	38	172	12	–	5,7	1,8	3,8
2	Гипсопемцементновермикулитовый раствор, пепел фракции 0–0,315 мм (предлагаемый)	580	154	38	137	135	–	5,7	1,8	3,8
3	Гипсопемцементновермикулитовый раствор, пемза фракции 0–0,315 мм (предлагаемый)	540	154	38	137	–	103	5,7	1,8	3,8

Определяем стоимость материалов на 1 м² огнезащитной штукатурки толщиной 20 мм (таблица 5.21).

Таблица 5.21 – Техничко-экономическое сравнение 1 м² огнезащитного штукатурного раствора по стоимости материалов

№№ вариантов	Вид раствора	Средняя плотность ρ, кг/м ³	Расход материала, кг								Стоимость материала, руб								Стоимость 1 м ²
			гипс	цемент	вермикулит	пепел	пемза	волокно		Д-5	гипс	цемент	вермикулит	пепел	пемза	волокно		Д-5	
								базальтовое	полипропиленовое							базальтовое	полипропиленовое		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	Гипсоцементновермикулитовый раствор, пепел фракции 0–0,16 мм (эталон)	480	3,08	0,76	3,44	0,24	–	0,114	0,036	0,076	15,4	7,3	330,2	0,3	–	45,6	6,5	10,2	415,5
2	Гипсопемлоцементновермикулитовый раствор, пепел фракции 0–0,315 мм (предлагаемый)	580	3,08	0,76	2,74	2,7	–	0,114	0,036	0,076	15,4	7,3	263,0	3,37	–	45,6	6,5	10,2	351,4
3	Гипсопемзоцементновермикулитовый раствор, пемза фракции 0–0,315 мм (предлагаемый)	540	3,08	0,76	2,74	–	2,06	0,114	0,036	0,076	15,4	7,3	263,0	–	2,57	45,6	6,5	10,2	350,5

Разработанные фиброгипсоцементновермикулитовые огнезащитные растворы с применением вулканического пепла и пемзы фракции 0–0,315 мм взамен части вспученного вермикулита фракции 0–0,315 мм дешевле эталонных огнезащитных растворов на 64 руб. 10 коп и 65 руб соответственно на 1 м² стоимости материалов огнезащитной штукатурки толщиной 20 мм. Необходимо отметить, что фиброгипсоцементновермикулитовые растворы с применением вулканической пемзы при меньшей стоимости имеют более высокие огнезащитные свойства.

Выводы по пятой главе

1. Добавка Д-5 вызывает сокращение сроков схватывания штукатурных растворных смесей до 20 – 30 %, обеспечивает повышение предела прочности при сжатии в зависимости от вида вяжущего, соотношения вяжущее/заполнитель и возраста раствора от 9 % до 60 %, в меньшей степени эффект проявляется в составах без ПЦ и в возрасте 2 ч. Добавка Д-5 практически не влияют на зависимость $R_f = f(R)$ штукатурных растворов.

2. Дисперсное армирование штукатурных растворов в зависимости от вида заполнителя и соотношения комбинированное вяжущее/заполнитель обеспечивает рост предела прочности при изгибе:

- базальтовыми волокнами через 2 ч в 1,57 – 1,61 раза, через 28 сут в 1,65 – 1,69 раза;

- полипропиленовыми волокнами через 2 ч в 1,04 – 1,11 раза, через 28 сут в 1,07 – 1,12 раза;

- базальтовыми и полипропиленовыми волокнами через 2 ч в 2,05 – 2,16 раза, через 28 сут в 2,06 – 2,13 раза.

3. Дисперсное армирование штукатурных растворов в зависимости от вида заполнителя и соотношения комбинированное вяжущее/заполнитель обеспечивает рост предела прочности при сжатии:

- базальтовыми волокнами через 2 ч в 1,09 – 1,15 раза, через 28 сут в 1,23 – 1,38 раза;

- полипропиленовыми волокнами через 2 ч в 1,02 – 1,13 раза, через 28 сут в 1,02 – 1,1 раза;

- базальтовыми и полипропиленовыми волокнами через 2 ч в 1,45 – 2,17 раза, через 28 сут в 1,36 – 2,19 раза.

4. Дисперсное армирование штукатурных растворов в зависимости от вида заполнителя и соотношения комбинированное вяжущее/заполнитель при равной прочности при сжатии обеспечивает рост предела прочности при изгибе:

- в 1,02 – 1,09 раза при армировании полипропиленовой фиброй;

- в 1,44 – 1,27 раза при армировании базальтовыми волокнами;

- в 1,53 – 1,47 раза при полидисперсном армировании.

5. Разработанные огнезащитные штукатурные растворы с вулканическим пеплом и пемзой соответствуют требованиям ГОСТ 28013–98 и могут производиться по технологии сухих строительных смесей.

6. Фиброгипсоцементновермикулитовые огнезащитные растворы с применением вулканического пепла и пемзы фракции 0–0,315 мм взамен части вспученного вермикулита фракции 0–0,315 мм дешевле эталонных огнезащитных растворов на 64 руб. 10 коп и 65 руб соответственно на 1 м² стоимости материалов огнезащитной штукатурки толщиной 20 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненной работы

1. При рациональной дозировке портландцемента 20 % в составе гипсоцементного вяжущего обеспечивается повышение предела прочности при сжатии и изгибе более чем в 1,5 раза. В составе гипсопеплового вяжущего при введении 20 % портландцемента обеспечивается повышение предела прочности при сжатии от 1,17 раза при Г:П=1:1 до 1,37 раза при Г:П=1:2, при изгибе от 1,1 раза при Г:П=1:1 до 1,23 раза при Г:П=1:2. Коэффициент размягчения при этом от возрастает 0,45 до 0,7 раза при Г:П=1:1 и от 0,4 до 0,6 при Г:П=1:2.

2. Полидисперсное армирование базальтовыми ($l/d = 1444$; 1,3, мас. %) и полипропиленовыми (длиной 12 мм; 0,42, мас. %) волокнами позволило по сравнению с составами на базальтовых волокнах повысить прочность фиброгипсопеплоцементного композита на сжатие более чем в 1,37-1,38 раза, на изгиб в 1,33-1,35 раза в возрасте 2 часов и 28 суток.

3. Пофракционное введение пепла при приготовлении смеси обеспечивает рост предела прочности. При переходе от литевой технологии к вибрационной рост прочности при сжатии составляет до 53 %, при уплотнении с пригрузом до 93 %. При изгибе соответственно предел прочности возрастает до 49 % и 87 %. Дисперсное и полидисперсное армирование обеспечивает повышение соотношения прочностей изгиб/сжатие примерно в 1,5 раза независимо от способа формирования.

4. Дозировка СДО до 0,2 % не оказывает негативного влияния на предел прочности при сжатии гипсоцементновермикулитобетонных композитов в возрасте 28 сут. При дозировке СДО 0,3 % снижение предела прочности при сжатии не превышает 7 %. При равной прочности при сжатии рост предела прочности при изгибе составляет до 1,09 раза при армировании полипропиленовой фиброй, до 1,44 раза при армировании базальтовыми волокнами, до 1,53 раза при полидисперсном армировании. Добавка СДО обеспечивает повышение объема вовлеченного воздуха от 2,3 до 3,1 % на 0,1 % СДО при дозировке СДО до 0,2 % и от

0,8 до 1 % при дозировке СДО 0,3 %. Соотношение гипс/вермикулит мало влияет на величину воздухововлечения.

5. Уровень 0,9 от максимальной прочности обеспечивается при отношении длины базальтового волокна к диаметру от 1100 до 1800. В зависимости от состава гипсоцементовермикулитопеплобетонной матрицы при армировании высоко модульными волокнами повышение предела прочности при сжатии может составлять до 1,16 раза, при изгибе до 1,73 раза, при армировании полипропиленовыми волокнами при сжатии до 1,07 раза, при изгибе до 1,13 раза, при полидисперсном армировании при сжатии до 1,4 раза, при изгибе до 2,3 раза, Замена в дисперсно-армированных составах пепла пемзой приводит к повышению прочности при сжатии в 1,15-1,73 раза, отношение прочностей изгиб/сжатие возрастает до 1,42 раза.

6. Предел огнестойкости разработанных композитов в зависимости от состава, средней плотности от 480 до 700 кг/м³ и толщины слоя от 10 до 20 мм по критерию теплопроводности составил от 31 до 140 мин, по критерию несущей способности от 60 до 350 мин. Получены зависимости коэффициентов теплопроводности и удельной теплоемкости от температуры разработанных фиброгипсоцементовермикулитопеплобетонных и фиброгипсоцементовермикулитопемзобетонных композитов.

7. Для приготовления фиброгипсоцементовермикулитопеплобетонной и фиброгипсоцементовермикулитопемзобетонной смеси целесообразно использовать турбулентный смеситель. Для литых смесей рекомендуется после подачи воды с добавкой СДО в смеситель вначале загружать предварительно перемешанную всухую смесь гипса, портландцемента, пепла (пемзы) и базальтового волокна, предварительно готовить смесь, а затем после добавления вспученного вермикулита повторно перемешать.

8. Разработанные фиброгипсоцементовермикулитовые огнезащитные штукатурные растворы с вулканическим пеплом или пемзой соответствуют требованиям ГОСТ 28013–98 и могут производиться по технологии сухих строительных смесей. Добавка Д-5 практически не влияет на зависимость $R_f = f(R)$

штукатурных растворов. Замена части вспученного вермикулита фракции 0–0,315 мм на пепел либо пемзу таких же фракций обеспечивает снижение себестоимости материалов на 1 м² огнезащитного слоя толщиной 20 мм в ценах 2026 г. относительно эталонных огнезащитных составов на вспученном вермикулите 64 руб. 10 коп и 65 руб.

Перспективы дальнейших исследований. Целесообразно исследовать эффективность применения других химических добавок в составе огнезащитных композитов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. 13188011001REPFILE.pdf - Яндекс Документы.
2. Analiz_obstanovki_s_pozharami_i_ih_posledstvijami_na_territorii_RF.pdf - Яндекс Документы.
3. СП 112.13330.2011 «СНиП 21-01-97* Пожарная безопасность зданий и сооружений» (далее - СП 112.13330.2011).
4. СНиП 31-01-2003 (2.08.01-89*) Здания жилые многоквартирные.
5. СНиП 2.08.02-89* Общественные здания и сооружения.
6. ГОСТ 30403-2012 Конструкции строительные. Метод испытания на пожарную опасность.
7. ГОСТ 30247.0-94 Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
8. Романенков И.Г., Зигерн-Корн В.Н. Огнестойкость строительных конструкций из эффективных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 241 с.
9. Ильин Н.А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1979. – 128 с.
10. Ройтман М.Я. Основы противопожарного нормирования в строительстве – изд-во литературы по строительству, – М., 1969 – 480 с.
11. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. – М.: Стройиздат, 1991. – 320 с.
12. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов / ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко – М.: Стройиздат, 1985. – 61с.
13. Бушев В.П., Пчелинцев А.В., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий. – М.: Стройиздат, 1970. – 261 с.
14. Хежев Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона // Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н., г. Ростов-на-Дону, 2007.

15. Страхов В.Л., Гаращенко А.Н. Огнезащита строительных конструкций: современные средства и методы оптимального проектирования // Строительные материалы. – 2002. № 6. – С. 2 – 5.
16. Страхов В.Л., Крутов А.М., Давыдкин И.Ф. Огнезащита строительных конструкций / Под ред. Ю.А. Кошмарова. – М.: ТИМР, 2000. – 433 с.
17. Building Materials Directory, Underwrites laboratories, January, 1980, 537 p.
18. Fire Resistance Directory, Underwrites Laboratories, January, 1981, 704 p.
19. Хежев, Х.А. Фиброгипсобетонные композиты с применением вулканических горных пород: дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2013. – 160 с.
20. Paschen H. Bemessung für angemessene Feuerwiderstandsdauer. - Betonwerk+Fertigteil-Technik. Heft 5/1974. Bd 40. № 5. S. 334 - 342.
21. СП 468.1325800.2019 Бетонные и железобетонные конструкции.
22. Милованов А.Ф. Огнестойкость железобетонных конструкций. – М.: Стройиздат, 1986. – 224 с.
23. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. – М.: Стройиздат, 1972. – 128 с.
24. Бушев З.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И. Огнестойкость зданий. – М.: Стройиздат, 1970. – 260 с.
25. Thermax Brandschutzplatte. Firma Isovolta. Information Osterreichische Isolierstoffwerke Aktiengesellschaft. 1977.
26. Махалов И.С., Сорин В.С. Огнезащиту стальных строительных конструкций - на новый технический уровень // Промышленное строительство. – М., 1980. № 3. – С. 28 – 30.
27. Хлевчук В.Р., Артыкпаев Е.Т. Огнезащита металлических конструкций зданий. – М.; Стройиздат, 1973. – 97 с.
28. Жуков А.З. Жаростойкие и огнезащитные фиброармированные композиты с применением вулканических горных пород: дисс. ... канд. техн. наук. – Ростов-на-Дону, 2016. – 139 с.

29. Зубарев Н.Н. Вермикулит – новый вид теплоизоляции // Труды БИМС. – 1939. № 146. – С. 16 – 34.
30. Шиманко А.И. Термоизоляционные изделия из обожженного вермикулита. – Минеральное сырье. 1936. № 11. – С. 26 – 35.
31. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П., Тихонов Ю.М. Новый изоляционный материал. // Пожарное дело. – 1967. № 6. – С. 30 – 31.
32. Никольский Г.Г., Пожнин А.П. Вермикулит и его применение в строительстве // Всесоюзное объединение «Знание». Серия строительная промышленность. – М., 1959. Вып. 13. – 19 с.
33. Руководство по составам и применению теплоизоляционных и огнестойких перлитовых штукатурок. – М.: Стройиздат, 1975. – 15 с.
34. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П. Вермикулит. – Л.: Стройиздат, 1971. – 175 с.
35. Тихонов Ю.М. Исследование вермикулита и растворов на его основе с целью применения их в конструкциях стен и полов зданий. Дис ... канд. техн. наук / Ленингр. инженер.- строит. ин-т. Л., 1972. – 196 с.
36. Steel Strategy and Fire Protection. - International Construction. 1972. Vol. 11. № 1. P. 13 – 15.
37. Панарин С.Н., Хежев Т.А. Армоцементные конструкции повышенной огнестойкости. Наглядное пособие. Л.: ЛДНТП, 1982. – 23 с.
38. Хежев Т.А. Технология армоцементных конструкций высокой огнестойкости с теплозащитным слоем из эффективного легкого бетона: дисс... д.т.н. – Ростов-на-Дону, 2007. – 304 с.
39. Гедеонов П.П., Спирина В.С. Цементно-вермикулитовые штукатурные растворы для жилых и общественных зданий // Строительные материалы на основе вермикулита, шлаков и зол. Сб. трудов УралНИИСтромпроект. Челябинск, 1975. С. 24 – 30.
40. ГОСТ 125—2018 Вяжущие гипсовые Технические условия.

41. Петропавловская В.Б., Бурьянов А.Ф., Новиченкова Т.Б. Малоэнергетические гипсовые материалы и изделия на основе отходов промышленности // Строительные материалы. – 2006. – №7. – С. 8–9.
42. Алкснис Ф.Ф. Твердение и деструкция гипсоцементных композиционных материалов. – Л.: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1988. – 103 с.
43. Балдин В.П. Современные виды эффективных гипсовых изделий и способы их производства / учебное пособие. – М.: ВНИИЭСМ, 1990. – 142 с.
44. Будников П.П. Гипс, его исследование и применение. – М.: Стройиздат, 1950. – 374 с.
45. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1979. – 473 с.
46. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Андреев Е.И. Стойкость минеральных волокон в среде фосфогипсоцементнопуццолановых вяжущих: кн. «Совершенствование химии и технологии строительных материалов». Сб. научн. тр. МИСИ-БТИСМ, 1984. – С. 44–45.
47. Волженский А.В., Стамбулко В.И., Ферронская А.В. Гипсоцементнопуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. – М.: Стройиздат, 1971. – 318 с.
48. Волженский А.В., Ферронская А.В. Гипсовые вяжущие и изделия. – М.: Стройиздат, 1974. – 328 с.
49. Крутов П.И., Цуканов Ю.С. Гипс и гипсовые изделия в сельском хозяйстве. – М.: Стройиздат, 1971. – 120 с.
50. Мещеряков Ю.Г. Гипсовые попутные промышленные продукты и их применение в производстве строительных материалов. – Л.: Стройиздат, 1982. – 144 с.
51. Патент РФ № 2052416. Сырьевая смесь для изготовления строительных изделий / Петраков Б.И., Лопаткин А.В. // Бюлл. № 1, 1996.
52. Сучков В.П. Гипсовые строительные материалы и изделия, полученные механохимической активацией техногенного сырья: автореф. дисс... д-ра техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т, 2009. – 42 с.

53. Волженский А.В. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.
54. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества. – М.: Стройиздат, 1979. – 473 с.
55. Волженский А.В., Ферронская А.В., Креймер Я.Е., Матвеева Л.Г. Опыт применения изделий на основе гипсоцементнопуццолановых вяжущих в строительстве животноводческих помещений Киргизской ССР // Строительные материалы. – 1969. – № 10.
56. Панченко А.И. Обеспечение стойкости бетона к физическим воздействиям внешней среды путем управления собственными деформациями: автореф. дисс... д-ра техн. наук. – Ростов-на-Дону, 1996. – 36 с.
57. Никулина Л.Б., Цуканов Ю.С., Богданович О.А., Смирнов Л.М. Гипс в сельском строительстве // Строительные материалы. – 1965. – № 5.
58. Романов А.А. Прокатные панели оснований пола. – М.: Стройиздат, 1968. – 92 с.
59. Цуканов Ю.С. Технология и некоторые строительные свойства гипсоцементных прокатных панелей: автореф. дисс... канд. техн. наук. – М., 1961.
60. Рекомендации по проектированию, изготовлению и применению изделий и конструкций из бетона на гипсоцементнопуццолановых вяжущих. – М.: ЦНИИСК, МИСИ, 1989.
61. Временная инструкция по производству и применению стеновых камней, ненесущих перемычек и теплоизоляционных плит из гипсоцементнопуццолановых и гипсовых бетонов для сельского строительства. – М.: Стройиздат, 1965.
62. Временные указания по изготовлению и применению крупноразмерных прокатных гипсоцементнобетонных панелей для оснований пола. – М.: Госстройиздат, 1962.
63. Волженский А.В., Коган Г.С., Цуканов Ю.С. Гипсоцементнопуццолановые вяжущие вещества и бетоны на их основе. Рязанская комплексная научно-

исследовательская станция-лаборатория по сельскому строительству НИИСС АСиА СССР. – Рязань, 1961.

64. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Чумаков Л.Д., Иванов С.В. Композиционные гипсовые вяжущие // Тезисы докладов научно-технической конференции «Научно-технический прогресс в технологии строительных материалов». – Алма-Ата, 1990. – С. 20–22.

65. Волженский А.В., Роговой М.И., Стамбулко В.И. Гипсоцементные и гипсошлаковые вяжущие и изделия. – М.: Госстройиздат, 1960. – 137 с.

66. Соломатов Р.И., Глаголева Д.В. и др. Высокопрочный бетон с активированным минеральным наполнителем // Бетон и железобетон. – 1986. – № 12. – С. 10–11.

67. Алтыкис М.Г. Экспериментально-теоретические основы получения композиционных и многофазовых гипсовых вяжущих веществ для сухих строительных смесей и материалов: автореф. дисс... д-ра техн. наук. – Пенза: Пензенский гос. ун-т архит. и строит., 2009. – 48 с.

68. Алтыкис М.Г., Рахимов Р.З. Гипс. Строительные материалы и изделия. – Казань, 1994. – 107 с.

69. Заикина А.С. Эффективные растворы на основе водостойкого гипсового вяжущего для наружной отделки: дисс... к.т.н. – М.: Московский гос. строит. ун-т, 2010. – 192 с.

70. Коровяков В.Ф. Повышение водостойкости гипсовых вяжущих веществ и расширение областей их применения // Строительные материалы и технологии XXI века. 2005. № 3. – С. 28 – 31.

71. Коровяков В.Ф. Повышение эффективности гипсовых вяжущих и бетонов на их основе: автореф. дисс... д-ра техн. наук. – М., Моск. гос. строит. ун-т, 2002. – 39 с.

72. Лесовик В.С., Погорелов С.А., Строкова В.В. Гипсовые вяжущие материалы и изделия. – Белгород: БелГТАСМ, 2000. – 223 с.

73. Морева И.В. Эффективные композиционные материалы на основе низкомарочного строительного гипса: автореф. дисс... д-ра техн. наук // Ивановский гос. архит.-строит. ун-т. – Иваново, 2009. – 40 с.

74. Морева И.В., Медяник В.В., Соколова Ю.А. Композиционные гипсовые вяжущие в современном строительстве: учебное пособие. – М.: ГАСИС, 2004. – 85 с.

75. Патент РФ № 2070172. Способ получения вяжущего / Ферронская А.В., Баженов Ю.М., Коровяков В.Ф., Мельниченко С.В., Чумаков Л.Д., Иванов С.В. // Бюлл. № 34, 1996.

76. Ферронская А.В. Гипс в современном строительстве // Строительные материалы. – 1995. – № 2. – С. 16–19.

77. Ферронская А.В. Эксплуатационные свойства бетонов на основе композиционного гипсового вяжущего // Строительные материалы. – 1998. – № 6. – С. 34.

78. Дейч М. Гипсовые плиты для отделки потолков и стен / На стройках России. – 1997. – № 5. – С. 12–13.

79. Нарышкина М.Б. Стеновые материалы на основе композиционного гипсового вяжущего повышенной водостойкости: дисс... к.т.н. – Белгород: Белгород. гос. технол. ун-т им. В.Г. Шухова, 2010. – 188 с.

80. Бурьянов А.Ф. Эффективные гипсовые материалы и изделия с использованием ультрадисперсных алюмосиликатных добавок и углеродных наномодификаторов: автореф. дисс... д-ра техн. наук.– М.; Московский гос. строит. ун-т. – 2012. – 37 с.

81. Соломатов В.И. Развитие полиструктурной теории композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1985. – № 8. – С. 58–64.

82. Соломатов В.И. Элементы общей теории композиционных строительных материалов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1980. – № 8. – С. 61–70.

83. Хежев Т.А., Пухаренко Ю.В., Хашукаев М.Н. Пенобетоны на основе вулканических горных пород // Строительные материалы. – 2005. – № 12. – С. 55–57.
84. Юрьев А.Г., Панченко Л.А., Лесовик Р.В. Волокнистые композиты в строительных конструкциях: монография. Белгород: БГТУ, 2006. – 90 с.
85. Сеница М.С. Исследование влияния армирования на свойства пенобетона // Приложение к журналу «Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века». – 2003. – № 9. – С. 8–9.
86. Волков И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве / Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 12–13.
87. Рабинович Ф.Н. Дисперсно армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 174 с.
88. Харчевников В.И. Основы структурообразования стекловолоконистых полимербетонов // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1987. – № 11. – С. 62–66.
89. Некрасов В.П. Метод косвенного вооружения бетона. Новый железобетон. – М.: Транспечать, 1925. – 255 с.
90. ВСН 56-97. Проектирование и основные положения технологий производства фибробетонных конструкций. – М., 1997. – 177 с.
91. Гулимова Е.В. Исследование коррозионной стойкости арматуры в сталефибробетоне: автореф. дисс... канд. техн. наук. Л.: Ленингр. инженер.-строит. ин-т, 1980. – 23 с.
92. Крылов Б.А. Фибробетон и перспективы его применения в строительстве // Фибробетон и его применение в строительстве. – М., 1979. – С. 4–11.
93. Лобанов И.А. Дисперсно-армированные бетоны, область их применения, пути качественного улучшения свойств // Производство строительных изделий и конструкций: сб. тр. Ленингр. инженер.-строит. ин-та, № 114. – Л., 1976. – С. 5–22.

94. Лобанов И.А., Талантова К.В. Особенности подбора состава стале-фибробетона // Производство строительных изделий и конструкций: сб. тр. Ленингр. инженер.-строит. ин-та, №114. – Л., 1976. – С. 22–32.

95. Лобанов И.А., Копацкий А.В., Талантова К.В., Малышев В.Ф. О влиянии технологических параметров изготовления сталефибробетона на его свойства / Производство строительных изделий и конструкций: сб. тр. Ленингр. инженер.-строит. ин-та. № 114 – Л., 1976. – С. 32–42.

96. Панарин С.Н., Миронков Б.А. Армоцементные конструкции массового применения / Ленингр. дом науч.-техн. пропаганды. – Л., 1975. – 32 с.

97. Пухаренко Ю.В. Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореф. дисс... д-ра техн. наук. СПб.: Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т, 2005. – 42 с.

98. Пухаренко Ю.В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий // Электронный научный журнал «Современные проблемы науки и образования». – 2012. – № 4. URL: www.science-education.ru/104-6582.

99. Рабинович Ф.Н., Шикунев Г.А. Эффективность применения стале-фибробетона в промышленном строительстве // Применение фибробетона в строительстве. – Л., 1985. – С. 9–15.

100. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции. – М., 2007. – 56 с.

101. Тупицина В.Н. К механизму разрушения бетона и фибробетона при многократном воздействии замораживания // Исследование и расчет экспериментальных конструкций из фибробетона. – Л., 1976. – С. 102–106.

102. Багров Б.О., Гуменюк Н.Т., Васильева Т.Д. Дисперсно-армированный ячеистый бетон на шлакощелочном вяжущем // Ячеистый бетон и ограждающие конструкции из него. – М., 1985. – С. 15–18.

103. Беркович Т.М. Основы технологии асбестоцемента. – М.: Стройиздат, 1979. – 233 с.

104. Моргун Л.В. Эффективность применения фибропенобетона в современном строительстве // Строительные материалы. – 2002. – № 3. – С. 16–17.
105. Рабинович Ф.Н. Бетоны, дисперсно-армированные волокнами. – М., 1976. – 73 с.
106. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография / 3-е изд., перераб. и доп. – М.: АСВ, 2004. – 560 с.
107. Фибробетон и его свойства // Стр-во и архитектура. Сер. «Строит. материалы, изделия и конструкции»: обзор. информ.: зарубеж. опыт. Вып. 4. Сост. Б.А. Крылов. – М., 1979. – 45 с.
108. Холистер Г.С., Томас К. Материалы, упроченные волокнами / пер. с англ. Б.А. Клыкиной; Под ред. В.С. Ивановой. – М.: Металлургия, 1969. – 153 с.
109. Makitani E., Sekiya S., Hagiwara I. A study on bond strength in steel fibre reinforced concrete // Rev. 33rd Gren. Meet. Cem. Assoc. Tokyo, 1979. Sinepses, Tokyo, 1979. – P. 190–192.
110. Лобанов И.А. Основы технологии дисперсно-армированных бетонов (фибробетонов): автореф. дисс... д-ра техн. наук. Л.: Ленингр. инженер.-строит. ин-т, 1982. – 35 с.
111. Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Гурашкин Ю.А. Ударостойкость фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами // Технология и долговечность дисперсно-армированных бетонов. – Л., 1984. – С. 86–93.
112. Wallace N. Glass reinforced concrete – a new composite for construction // Construction Specifier. – 1977. – № 3. – P. 259–261.
113. Беркович Т.М. Структура и прочность дисперсно-армированных волокнистых композиций с цементной матрицей // Материалы нац. конф. «Механика и технология композиционных материалов». – София, 1977. – С. 782.
114. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Вестник гражданских инженеров (научно-технический журнал). СПб, СПбГАСУ, 2005. – № 1. – С. 54–62.

115. Швидко Я.И. Исследование прочностных и деформативных свойств дисперсно-армированных полимербетонов // Дисперсно-армированные бетоны и конструкции из них: тез. докл. и сообщ. Латв. респ. совещ. – Рига, 1975. – С. 102–106.
116. Developments in fibre-reinforced concrete. // Consult. Eng. (Gr. Brit.). – 1978. – № 3. – P. 321.
117. Kapuna A. Perspektywy modyfikacji wkaśneci asbestocementu wicrnami szklanymi oras zintetycznymi // Przoglad Budowiany. – 1972. – № 2. – S. 41–43.
118. Стерин В.С. Приготовление сталефибробетонных смесей // Применение фибробетона в строительстве: Материалы краткосроч. семинара, 4–5 июля 1985 г. – Л., 1985. – С. 27–31.
119. Махова М.Ф. Базальтоволоконистые материалы // Обзор ВНИИЭСМ. – М., 1989. – 72с.
120. Джигирис Д.Д., Махова М.Ф. Основы производства базальтовых волокон и изделий. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 416 с.
121. Ферронская А.В., Андреев Е.И., Коровяков В.Ф. Долговечность дисперсноармированных композиций: кн. «Совершенствование химии и технологии строительных материалов»: сб. научн. тр. МИСИ-БТИСМ, 1984. – С. 48 – 50.
122. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Андреев Е.И. Стойкость минеральных волокон в среде фосфогипсоцементнопуццолановых вяжущих: кн. «Совершенствование химии и технологии строительных материалов». Сб. научн. тр. МИСИ-БТИСМ, 1984. – С. 44–45.
123. Батраков В.Г., Каприелов Ф.И., Иванов Ф.И., Шейнфельд А.В. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон // Бетон и железобетон. – 1990. – №12. – С. 15–17.
124. Берней И.И. Технология асбестоцементных изделий. – М.: Высш. шк., 1977. – 230 с.
125. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение): справочник под общ. ред. А.В. Ферронской. – М.: АСВ, 2004. – 488 с.

126. Баженов Ю.М. Повышение эффективности и экономичности технологии бетона // Бетон и железобетон. – 1988. – №9. – С. 22–25.
127. Баженов Ю.М., Алимов Л.А., Воронин В.В. Развитие теории формирования структуры и свойств бетонов с техногенными отходами // Изв. вузов. – 1996. – №7. – С. 13–15.
128. Волженский А.В., Иванов И.А., Виноградов В.И. Применение золы и топливных шлаков при производстве строительных материалов. – М.: Стройиздат, 1984. – 256 с.
129. Комар А.Г., Величко Е.Г. Теоретические основы применения минеральных добавок к вяжущим веществам в бетоне // Повышение технологичности и снижение материал-, энергоемкости сборного железобетона: сб. науч. тр. ВНИИ железобетона. – М., 1982. – С. 45.
130. Кузнецова Т.В., Плотников В.В., Кривобородов Ю.В. Структурообразование при активации высокодисперсных систем // V1 республиканская конференция по физико-химии, технологии получения и применения промышленных жидкостей, дисперсных систем и тампонажных растворов. – Иваново-Франковск, 1985. – С. 97–98.
131. Батраков В.Г., Каприелов Ф.И., Иванов Ф.И., Шейнфельд А.В. Оценка ультрадисперсных отходов металлургических производств как добавок в бетон // Бетон и железобетон. – 1990. – №12. – С. 15–17.
132. Ахматов М.А. Эффективность применения местных строительных материалов и бетона. – Нальчик: Эльбрус, 1986. – 160 с.
133. Ахматов М.А. Применение отходов камнепиления туфкарьеров и рыхлых пористых пород в качестве заполнителей легких бетонов и конструкций из них. – Нальчик, 1981. – 128 с.
134. Маилян Р.Л., Ахматов М.А. Железобетон на пористых каменных отходах. – М.: Стройиздат, 1987. – 206 с.
135. Симонов М.З. Исследование некоторых особенностей бетона и железобетона на пористых заполнителях: автореф. дисс... канд. техн. наук. Ереван, 1953. – 62 с.

136. Некрасов К.Д., Масленникова М.Г. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1982. – 152 с.
137. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф., Баранов И.М., Бурьянов А.Ф., Лосев Ю.Г., Поплавский В.В., Шишин А.В. Гипс в малоэтажном строительстве. – М.: АСВ, 2008. – 240 с.
138. Гипс: исследование и применение гипсовых строительных материалов / пер. с нем. под ред. В.Б. Ратинова. – М.: Стройиздат, 1981. – 223 с.
139. Географическое размещение, особенности добычи и обогащения, перспективы развития производства природных пористых заполнителей / Минасян Г.С., Еременок П.Л., Татишвили А.З., Холошин Е.П. // Перспективы развития производства и применения легких бетонов и конструкций из них. – М., 1978. – С. 142–147.
140. Тагамлик В.И. Нальчикский вулканический пепел и его применение в строительстве // Строительные материалы. – 1931. – №5. – С. 83–97.
141. Вавренюк С.В., Кораблева Г.А. Вулканические породы Дальнего Востока как сырье для производства природных пористых заполнителей в бетоны // Технологии бетонов. – 2009. – № 5. – С. 16–17.
142. Вавренюк С.В., Кораблева Г.А., Антропова В.А. Бетоны на пористых заполнителях из вулканических горных пород Дальнего Востока. – Владивосток: Дальневосточный Федеральный университет, 2012.
143. Масуренков Ю.П. Кайнозойский вулканизм Эльбрусской вулканической области // Тр. Ин-та геологии руд, месторождений, петрографии, минералогии и геохимии. Вып. 51 – М.: АН СССР, 1961. – 132 с.
144. Аракелян А.А. Легкие бетоны для крупных стеновых блоков на туфовых и пемзовых заполнителях. – Ереван: Айпетрат, 1962. – 139 с.
145. ГОСТ 20910–2019. Бетоны жаростойкие. Технические условия.
146. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П. Вермикулит. – Л.:Стройиздат, 1971. – 175 с.
147. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П., Тихонов Ю.М. Новый изоляционный материал. // Пожарное дело. 1967. № 6. С. 30 – 31.

148. Никольский Г.Г., Пожнин А.П. Вермикулит и его применение в строительстве // Всесоюзное объединение «Знание». Серия строительная промышленность. М., 1959. Вып. 13. – 19 с.
149. Зубарев Н.Н. Вермикулит – новый вид теплоизоляции // Труды БИМС. 1939. № 146. С. 16 – 34.
150. Шиманко А.И. Термоизоляционные изделия из обожженного вермикулита. – Минеральное сырье. 1936. № 11. С. 26 – 35.
151. Жуков А.П., Байвель И.Я., Кашперовская О.П. и др. Материалы и изделия на основе вспученного перлита. – М.: Стройиздат, 1972. – 159 с.
152. Сухарев М.Ф., Майзель И.Л. Жароупорный теплоизоляционный перлитобетон. М., 1964.
153. Руководство по составам и применению теплоизоляционных и огнестойких перлитовых штукатурок. – М.: Стройиздат, 1975. – 15 с.
154. Горлов Ю.П., Меркин А.П. и др. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол. – М.: Стройиздат, 1986, 144 с.
155. Некрасов К.Д., Масленникова М.Г. Легкие жаростойкие бетоны на пористых заполнителях. – М.: Стройиздат, 1982. – 152 с.
156. Мириев И.М., Гусейнова Л.Г. Исследование физико-механических свойств легкого заполнителя, полученного на базе вулканического пепла // Сб. докладов 7-й Объединенной сессии научн.-исслед. Институтов Закавказских республик по строительству. Баку, 1971.
157. Баженов Ю.М., Батаев Д.К.-С., Муртазаев С.-А.Ю. Энерго- и ресурсосберегающие материалы и технологии для ремонта и восстановления зданий и сооружений. – М.: «Комтех-Принт», 2006. – 235 с.
158. Рахимбаев Ш.М. Регулирование технических свойств тампонажных растворов. – Ташкент: Фан, 1976. – 159 с.
159. Селиванов В.М. и др. Строительные растворы на основе компонентов из отходов промышленности // ПГС. - 2000. - № 11. - С. 26-27.
160. Воронин А.А. Использование золы гидроудаления в бетонах и растворах // Строительные материалы, - 1992. - №2. - С. 20-21.

161. Лесовик Р.В., Ворсина М.С. Высокопрочный бетон для покрытия автомобильных дорог на основе техногенного сырья // Строительные материалы. – 2005., №5. – 46-47.

162. Крыжановский И.И., Свидерская О.И. Методика планирования эксперимента при решении типовой задачи о выборе химических добавок к бетону // Математические методы в исследованиях технологии бетона: тр. Всесоюз. науч.-исслед. ин-та водоснабжения, канализации, гидротехн. сооружений и инженер. гидрогеологии. Вып. 5. – Харьков, 1971. – С. 102–114.

163. Лысенков А.Н. О некоторых планах второго порядка и их использовании при исследовании многофакторных объектов // Проблемы планирования эксперимента. – М., 1969. – С. 63–69.

164. Математическая обработка эксперимента и его планирование: учеб. пособие / Карпов В.В., Коробейников А.В., Малышев В.Ф., Фролькис В.А. М.: АСВ; СПб.: С.-Петербург. гос. архитектур.-строит. ун-т, 1998. – 100 с.

165. Налимов В.В., Чернова Н.А. Статистические методы планирования экстремальных экспериментов. – М.: Наука, 1965. – 340 с.

166. Несветаев Г.В. Бетоны. Учебно-справочное пособие. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2013 – 382 с.

167. Несветаев Г.В., Налимова А.В. Структурообразование модифицированных смесей на различных вяжущих для наливных полов / Строительство 2005 Материалы межд. конф. Ростов-на-Дону: РГСУ, 2005.

168. Хашукаев М.Н. Технология и свойства ячеистых фибробетонов на основе вулканических горных пород: дисс... к.т.н. – СПб. : Санкт-Петербургский гос. архит.-строит. ун-т, 2002. – 127 с.

169. Баженов Ю.М., Коровяков В.Д., Денисов Г.А. Технология сухих строительных смесей / учебное пособие. – М.: АСВ, 2003. – 96 с.

170. Хежев Х.А., Хежев Т.А., Кимов У.З., Думанов К.Х. Огнезащитные и жаростойкие композиты с применением вулканических горных пород // Инженерный Вестник Дона. – 2011.– №4. Режим доступа <http://ivdon.ru>.

171. Ферронская А.В., Коровяков В.Ф. Бетоны на многокомпонентных гипсовых вяжущих: сб. материалы 1-й Всероссийской конференции по проблемам бетона и железобетона. – М., 2001.

172. Хежев Т.А., Хаджишалапов Г.Н., Журтов А.В., Шогенова Ф.М. Строительно-технические свойства вермикулитобетона и фибровермикулитобетона с вулканической пемзой при воздействии повышенных температур // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2023. – Т. 50, № 1. – С. 215-228. – DOI 10.21822/2073-6185-2023-50-1-215-228.

173. Дубенецкий К.Н., Пожнин А.П., Тихонов Ю.М. Новый изоляционный материал. // Пожарное дело. – 1967. – № 6. – С. 30–31.

174. Несветаев Г.В., Кардумян Г.С. Прочность цементного камня с суперпластификаторами и органоминеральными модификаторами с учетом его собственных деформаций при твердении / Бетон и железобетон. – 2013. – № 5. – С. 6-8.

175. Яковлев А.И. Основные принципы расчета пределов огнестойкости строительных конструкций // Огнестойкость строительных конструкций: Сб. тр. ВНИИПО. М., 1980. Вып. 8. С. 3 – 14.

176. Яковлев А.И. Расчет огнестойкости строительных конструкций. М.: Стройиздат, 1888. – 142 с.

177. Хежев Т.А., Культербаев Х.П. Теплотехнический расчет огнестойкости многослойных строительных конструкций // Вестник Кабардино-Балкарского гос. ун-та / Сер. «Технические науки». Вып. 4. – Нальчик: КБГУ, 2000. – С. 9–11.

Характеристика неметаллических волокон*

Виды волокон	Диаметр волокна, мкм	Плот- ность, г/см ³	Прочность на растяжение, x10 ³ МПа	Модуль упругости, x10 ³ МПа	Отношение к щелочам
1	2	3	4	5	6
1. Минеральные					
асбестовое	20	2,5	5-7	50-70	стойкие
стеклянные алюмоборосиликатн.	18 - 20	2,6	1,1-3,8	7-8	малостойкие
стеклянные циркониевые	40	2,2-2,8	0,7-0,75	70-80	стойкие
кварцевые	-	2,65	25	70	-
углеродные	7,0 - 9,0	2	2	245	-
базальтовые	15-20	3	1,2	67	сравнитель- но стойкие
борные	100	2,6	2,5-3,8	400	-

Примечание: * - по данным [14, 19, 28 105, 106, 108, 113]

Характеристика растительных, химических, синтетических волокон*

2. Растительные					
льняные	14-18	1,5	0,4-1,3	20-30	малостой- кие
хлопковые	-	1,5	0,4	5-10	-
древесные	-	1,5	0,9	74	-
пеньковые	-	1,5	0,9	58	-
3. Химические					
вискозные	-	1,5	0,08	8,4	нестойкие
шелковые	-	1,3	0,45	7	-
целлюлозные	-	0,7-0,8	0,02-0,1	1-10	-
4. Синтетические					
полипропиленовые	26-34	0,93	0,4-0,77	3,5-8	стойкие
лавсановые	15-20	1,4	0,5-0,78	8,4	малостой- кие
хлориновые	16	1,4	0,3	1,3-1,5	стойкие
нейлоновые	25	1,1	0,46-0,57	2,3	весьма стойкие
капроновые	28-80	1,14	0,41-0,93	4,4-4,9	

Примечание: * - по данным [14, 19, 28 105, 106, 108, 113]

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Таблица П 3.1

Химический состав некоторых вулканических туфов*

Наименования месторождений	Содержание основных компонентов в по массе, %									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO	Na ₂ O+ +K ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Каменское	74,44	7,69	1,37	1,16	1,81	0,1	0	5,56	0,2	1,60
Заюковское	73,1	13,75	1,75	1,65	1,12	0	0,23	3,87	0,12	2,0
Лечинкайское	64,35	12,23	1,27	2,6	1,2	0,1	0	0,4	0	7,3

Примечание: * - по данным [19, 28, 143]

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Таблица П 4.1

Химический состав рыхлых вулканических пород*

Месторождения	Содержание основных компонентов в % от массы							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O+ +K ₂ O	SO ₃	п.п.п.
Кенженское, пепел	72,96	12,98	1,42	3,91	0,48	6,40	0,02	2,86
Каменское, пеплопемза	72,80	13,15	1,80	2,38	0,50	6,30	0,02	4,30
Бедик-Су, пумицит	62,72	11,97	1,66	8,0	2,26	5,91	0,1	5,88

Примечание: * - по данным [19, 28, 143]

Утверждаю

ФИРМА «СТРОЙИНДУСТРИЯ» ООО

Кушхов Р.Л.

28 ноября 2024 г.



СПРАВКА

Выдана Шогеновой Ф.М., старшему преподавателю кафедры «Архитектура и дизайн» Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова в том, что разработанные им теплоогнезащитные фиброгипсоцементовермикулитобетонные композиты с применением вулканического пепла и пемзы используются для огнезащиты строительных конструкций. Из фиброгипсоцементовермикулитобетонного композита со средней плотностью 480-590 кг/м³ изготавливаются огнезащитные плиты толщиной 20-25 мм.

Используемое соотношение компонентов в фиброгипсоцементовермикулитобетонной смеси с применением пепла, мас. %: гипсовое вяжущее – 40,1; вспученный вермикулит Санкт-Петербургской слюдяной фабрики фракции 0,16–5 мм – 44,85; портландцемент – 10,0; вулканический пепел Заюковского месторождения фракции 0–0,16мм – 3,0; смола древесная омыленная (СДО) – 0,07; базальтовые волокна производства АО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с – 1,5; полипропиленовые фибры RS производства ООО «Руссеал» – 0,48.

Используемое соотношение компонентов в фиброгипсоцементовермикулитобетонной смеси с применением пемзы, мас. %: гипсовое вяжущее – 40,1; вспученный вермикулит Санкт-Петербургской слюдяной фабрики фракции 0,63–5 мм – 19,33; портландцемент – 10,0; вулканическая пемза Псыхурейского месторождения КБР фракции 0–0,63 мм – 29,0; смола древесная омыленная (СДО) – 0,07; базальтовые волокна производства АО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с – 1,5.



Утверждаю

Директор ООО «Спас-спектр»

Арамисов Р.Б.

22 мая 2025 г.

СПРАВКА

Выдана Шогеновой Ф.М., старшему преподавателю кафедры «Архитектура и дизайн» Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова в том, что разработанные им фиброгипсоцементновермикулитовые огнезащитные растворы с применением вулканического пепла и пемзы используются для огнезащиты строительных конструкций. Фиброгипсоцементновермикулитовые огнезащитные растворы со средней плотностью 480–540 кг/м³ используются для огнезащитных штукатурок.

Соотношение компонентов в фиброгипсоцементновермикулитовой огнезащитной растворной смеси с применением пепла со средней плотностью 540 кг/м³: (гипс+портландцемент):(вермикулит вспученный фракции 0,315–2,5 мм+пепел фракции 0–0,315 мм)=1:3 по объему; базальтовые волокна производства АО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с – 1,3 по объему; полипропиленовые фибры RS производства ООО «Руссеал» – 1,2 по объему; полифункциональная добавка Д-5 – 2 % от массы вяжущего.

Соотношение компонентов в фиброгипсоцементновермикулитовой огнезащитной растворной смеси с применением пемзы со средней плотностью 480 кг/м³: (гипс+портландцемент):(вермикулит вспученный фракции 0,315–2,5 мм+пемза фракции 0–0,315 мм)=1:3 по объему; базальтовые волокна производства АО «Ивотстекло» марки РНБ-9-1200-4с – 1,3 по объему; полипропиленовые фибры RS производства ООО «Руссеал» – 1,2 по объему; полифункциональная добавка Д-5 – 2% от массы вяжущего.