

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Российский университет дружбы народов»
РУДН

На правах рукописи

Чиадигхикаоби Паскал Чимеремезе

**ОБЛЕГЧЕННЫЕ БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С
БАЗАЛЬТО-КОМПОЗИТНЫМ СТЕРЖНЕВЫМ И СЕТЧАТЫМ
АРМИРОВАНИЕМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ПРИБРЕЖНЫХ ЗОНАХ
НИГЕРИИ**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, доцент
Галишникова Вера Владимировна

Москва – 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 ОБЛЕГЧЕННЫЕ БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С БАЗАЛЬТО-КОМПОЗИТНЫМ СТЕРЖНЕВЫМ И СЕТЧАТЫМ АРМИРОВАНИЕМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ПРИБРЕЖНЫХ ЗОНАХ НИГЕРИИ	9
1.1 Постановка задачи.....	9
1.2 Обзор литературы на аналогичные темы	14
1.2.1 Армирование	15
1.2.2 Керамзит	21
1.2.3 Анализ рассматриваемого вопроса	24
1.2.4 Современное состояние строительства в Нигерии и проблемы с коррозией стальной арматуры	39
1.3 Вывод по главе 1	43
2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ	45
2.1 Процессы получения облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй в ходе лабораторного эксперимента	45
2.1.1 Материалы и экспериментальные исследования свойств облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй	45
2.1.2 Характеристики рубленого базальтового волокна, способствующие улучшению облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй	57
2.1.3 Пределы прочности конструктивных элементов из армированного базальтоволокнистым полимером облегченного керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй.....	62
2.2 Вывод по главе 2	73
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	74
3.1 Лабораторные экспериментальные результаты.....	74
3.1.1 Характеристики рубленого базальтового волокна, способствующие улучшению облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй	74
Испытания на сжатие образцов кубов облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй.....	74

3.1.2 Результаты пределы прочности конструктивных элементов из армированного базальтоволокнистым полимером облегченного керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй	84
3.2 Вывод по главе 3	111
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	112
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	114

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования обусловлена проблемами внедрения и использования базальтовых материалов в строительстве гражданских зданий и сооружений в Нигерии. Наибольшее воздействие на строительные конструкции в нашем современном мире оказывают природные факторы. Принимая во внимание определенные свойства железобетона и бетона с крупнозернистым гранитным наполнителем, мы считаем важным внедрение новых материалов для изготовления бетонных конструкций, которые будут служить человеку лучше и дольше, в зависимости от места и назначения такой конструкции. Из темы диссертации, «Облегченные базальтофибробетонные конструкции с базальто-композитным стержневым и сетчатым армированием для строительства в прибрежных зонах Нигерии» следует, что мы должны учитывать показатели прочности используемого в данном регионе строительного бетона, гарантирующие надежность и долговечность. Крайне важной становится разработка бетона с меньшим собственным весом, соответствующей прочностью, более высокими характеристиками по сравнению с обычным бетоном и способным выдерживать суровые условия окружающей среды.

Степень разработанности темы. Этой и близким темам посвящены работы российских и зарубежных авторов (Абдаллах М.Т., Баженов Ю.М., Василевская Н.Г., Волков И.В., Габрусенко В.В., Грановский А.Ф., Долголаптев В.М., Ключев А.В., Лещинский М.Ю., Окольникова Г.Э., Оснос С.П., Перфилов В.А., Рабинович Ф.Н., Сарайкина К.А., Шляхтина Т.Ф., Abdelhamid С., Ahmad S.H., Arisoy В., Balendran R.V., Carrasquillo R.L., Ceroni F., Chaohua J., Hamadallah A., High С., Holm T.A., Hong Zh.C., Iyer P., Koh C.G., Tumadhir M.B., Wang J., Zhang M.H., и др.). Они исследовали вопросы прочности, трещин, деформацию и прогиба облегченных керамзитобетонных конструкций с разным содержанием рубленого базальтового волокна, с базальтовой арматурой, а также усиленные базальтовой сеткой бетонные колонны при воздействии нагрузок, оказываемых непосредственно на элементы

этих конструкций. Особенности работы изогнутых и сжатых бетонных элементов с базальто-композитным армированием при нагрузках изучены недостаточно.

Цели исследования. Чтобы определить цели исследования, важно иметь представление о более ранних исследованиях в данной области. Чтобы сформулировать цели текущего исследования, необходимо принимать во внимание результаты предшествующих. Задача также состоит в том, чтобы провести исследование полностью независимо. Рассматриваются вопросы разработки экспериментальных проверок и реализации метода расчета на прочность и трещиностойкость поперечных сечений при изгибе базальтофибробетонных и обычных или предварительно напряженных конструкций с базальто-композитным стержневым армированием при статическом нагружении.

Задачи исследования. Для достижения указанной цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Построение экспериментальной модели пропорций бетонной смеси и разработка технологии получения облегченного керамзитобетона с базальтофибровым армированием.

2. Исследование и анализ прочностных характеристик облегченного керамзитобетона с базальтофибровым армированием в конструктивных элементах, таких как балки, колонны и плиты перекрытия.

3. Исследование и прояснение вклада керамзита в бетон как заполнителя.

4. Исследование и определение оптимальной доли рубленого базальтового волокна в облегченном керамзитобетоне с базальтофибровым армированием.

5. Исследование роли базальтовой фибры в облегченном керамзитобетоне с базальтофибровым армированием в трещиностойкости.

6. Вывод экспериментальной формулы прочности бетона.

Научная новизна диссертации состоит в получении новых сведений, касающихся прочности, деформативности и трещиностойкости изгибаемых керамзитобетонных элементов с дисперсным рубленым базальтовым волокном, базальто-композитным сетчатым армированием и базальтовой арматурой при воздействии статических нагрузок.

Практическая и теоретическая значимость проведенных исследований заключается в получении научно обоснованных результатов (диаграмм и зависимостей), применяемых для расчетов на прочность и трещиностойкость керамзитобетонных элементов с базальтовой фиброй и стержневым армированием базальтовой фиброй; в разработке на основе нелинейной деформируемой модели метода расчета на прочность и трещиностойкость керамзитобетонных элементов.

Личное участие соискателя в получении результатов, изложенных в диссертации, состоит в:

1. Постановке целей и задач исследования;
2. Составлении программы эксперимента, определении состава бетонов, технологии получения легкого бетона с базальтофибровым армированием;
3. Исследовании и анализе прочностных характеристик легкого бетона с базальтофибровым армированием в конструктивных элементах (балки, колонны и плиты);
4. Изучении особенностей применения керамзита в качестве заполнителя для получения легких бетонов;
5. Определении оптимального процента содержания рубленого базальтового волокна в легком бетоне с базальтофибровым армированием;
6. Исследовании влияния содержания базальтовой фибры на трещиностойкость керамзитобетонных конструкций;
7. Получении экспериментальных зависимостей для определения прочностных и деформативных характеристик легких бетонов;
8. Подготовке и публикации основных результатов исследований в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, SCOPUS и прочих изданиях.

Методология и методы исследования. Методы исследования, используемыми в данной диссертации, - обзор литературы, экспериментальные и аналитические. Для получения бетонных смесей был использован ряд компонентов. Эти компоненты оказывают индивидуальное воздействие на бетон. Бетонные кубы и призмы тестируются на 7-й, 14-й и 28-й день для проведения

необходимого анализа. БФ добавляют в бетонную смесь в отношении 0,45%, 0,9%, 1,2% и 1,6%, не забывая о контрольной смеси без БФ. Эти образцы подвергались двум основным испытаниям: на сжатие и изгиб. Хотя порядок их проведения различен.

Положения, выносимые на защиту:

1. Аналитические зависимости расчетной диаграммы нелинейной деформации базальто-фибро-армированного облегченного керамзитобетона под воздействием статической нагрузки.

2. Методика расчета на прочность и трещиностойкость поперечных сечений при сжатии и изгибе бетонных элементов с дисперсным рубленым базальтовым волокном, базальто-композитным сетчатым и армированием и с базальтовой арматурой при статическом нагружении, реализация деформационной модели, принимающей в расчет неармированный и базальто-фибро-армированный керамзитобетон.

3. Результаты численных исследований прочности, сжимаемости, деформирования и трещиностойкости при изгибе поперечных сечений бетонных элементов с армированием базальтовой фиброй при статическом нагружении.

4. Методы и результаты экспериментальных исследований прочности, деформирования и трещиностойкости при сжатии и изгибе поперечных сечений бетонных элементов с базальто-композитным армированием при статическом нагружении.

Степень достоверности результатов проведенных исследований обоснована корректным использованием общепринятых положений теории железобетона, строительной механики, механики твердого тела и предпосылок, установленных на основе обширного анализа теоретических и экспериментальных методик исследования прочности материалов и конструкций при статическом нагружении. Верификация предлагаемого метода расчета керамзитобетонных конструкций проводилась на основе результатов экспериментов, проведенных в лаборатории строительных материалов и строительных конструкций департамента строительства Инженерной академии РУДН с использованием современного

сертифицированного испытательного оборудования и проверенных измерительных приборов. Точность разработанного метода подтверждается удовлетворительной сходимостью результатов расчета с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были представлены в докладах и одобрены на научных семинарах Департамента строительства Инженерной академии РУДН (2017-2020 годы). Часть диссертации была представлена на семинаре и лекции в Технологическом университете Кросс-Ривер, Калабар, Нигерия (2018, 2019).

Публикации. Материалы диссертационного исследования полно представлены в 9 научных публикациях, в том числе 3 статьи опубликованы в журналах, включенных в Перечень РУДН/ВАК, 6 статей в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web of Science.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 167 наименований. Содержание диссертации изложено на 131 страницах, включая 70 иллюстраций, 12 таблиц.

1. ОБЛЕГЧЕННЫЕ БАЗАЛЬТОФИБРОБЕТОННЫЕ КОНСТРУКЦИИ С БАЗАЛЬТО-КОМПОЗИТНЫМ СТЕРЖНЕВЫМ И СЕТЧАТЫМ АРМИРОВАНИЕМ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА В ПРИБРЕЖНЫХ ЗОНАХ НИГЕРИИ

1.1 Постановка задачи

Нигерию с юга омывает Атлантический океан. Атлантический океан богат солью, нигерийская земля - сырьем и минеральными ресурсами; все это может быть использовано в интересах строительства. Исходя из этого, крайне необходимо, чтобы строительные материалы для данного типа окружающей среды обладали свойствами, способными противостоять ее воздействиям (коррозия, трещины, потеря прочности из-за повышенной кислотности). Примерами таких материалов являются базальтовое волокно в качестве армирующего материала и керамзит в качестве заполнителя для бетона. Далее в настоящей диссертации будут рассмотрены свойства этих материалов.

В Нигерии, как одной из развивающихся стран, дорогостоящие затраты на приобретение бетонных материалов для строительства на протяжении многих лет вынуждали пользователей идти на компромисс с качеством. Это привело к снижению производительности обслуживаемой инфраструктуры и к увеличению расходов на техническое обслуживание и ряду обрушений конструкций, сопровождавшихся человеческими жертвами и утратой имущества. В приречных районах Нигерии, главным образом в районе дельты Нигера, отсутствие достаточного количества крупнозернистого заполнителя в непосредственной близости вызывает необходимость завоза его из отдаленных районов. Это увеличивает общие затраты на строительство; следовательно, возникает необходимость в удовлетворяющих потребностям более легкодоступных альтернативных строительных материалах [82]. В строительстве крайне важно, чтобы материалы были доступны как в их производстве, так и по стоимости. Общей проблемой новых типов конструкций из высокоэффективных материалов является

вопрос их поведения в определенных специфических условиях и ситуациях. Температура в Нигерии с каждым сезоном повышается. К свойствам, учитываемым при использовании базальтовых материалов относятся удельный вес, прочность на растяжение, модуль упругости, деформация при разрыве и температура плавления. Упомянутое повышение температуры стало проблемой, вызывающей озабоченность ученых и инженеров. Эта озабоченность привела к решению в пользу базальтовых материалов в сооружении инженерных коммуникаций и зданий [86].

Традиционный железобетон, использующий конструкционную сталь, имеет широкий успех во всем мире на протяжении десятилетий. Вообще, сталь - это очень крепкий и прочный строительный материал, который будет использоваться еще долгие годы. Однако низкая коррозионная стойкость стального железобетона отрицательно сказывается на расчетном сроке службы. Если в отрасли не будет принято жизнеспособное решение, то конструкции в жестких условиях эксплуатации будут требовать постоянного технического обслуживания и/или замены. Это особенно проблематично для объектов гражданской инфраструктуры из-за ограниченности бюджетов. Жизнеспособное и экономичное решение проблемы коррозии железобетона потенциально может сэкономить миллиарды долларов как для государственного, так и для частного секторов. В настоящее время отрасль движется в направлении внедрения армированных волокном полимеров (пластиков) для эксплуатации в суровых природных условиях.

Легкий бетон может быть получен с использованием легких заполнителей, таких как керамзит или вулканический камень, или с использованием воздухововлекающих добавок к обычной бетонной смеси с крупнозернистым заполнителем или без него, таких как тонкая кремнеземная пыль [139]. Легкий конструкционный бетон можно определить как материал с замкнутой структурой, полученный полной или частичной заменой обычного заполнителя на искусственный легкий заполнитель из керамзита или кристаллического сланца. Облегчение таких конструкций, таких как балки, сваи и перекрытия, отлитых на

месте или сборных, возможна путем замены более крупного традиционного “природного” заполнителя (гравия или камней) на “искусственный” заполнитель, состоящий из керамзитовых гранул или сланцев. Использование никаких других, естественных или искусственных, легких инертных материалов, таких как полистирол, вулканические породы, пемза и т.п., не допускается (конструкционный легкий бетон с латеритным керамзитом).

Бетон является наиболее широко используемым конструкционным материалом в гражданском строительстве. Отдельными преимуществами бетона являются его высокая прочность на сжатие и долговечность. Однако бетон имеет такие недостатки, как высокий собственный вес, низкие прочность на растяжение, вязкость, ударная вязкость и ударопрочность [94,162,163]. Железобетон и фибробетон - два наиболее распространенных строительных материала. В бетоне в качестве композитов используются волокна - стальное волокно, углеродное, стекловолокно, базальтовое, синтетическое и растительное [143].

Текущие проектные требования, такие как АСІ-440.1 r-15 [49], содержат рекомендации по использованию базальтофибровой арматуры в качестве альтернативы стальной в бетонных конструкциях.

Композиционные материалы впервые приобрели популярность после Второй мировой войны, когда военная и аэрокосмическая промышленность расширили их применение в силу их высокой прочности и легковесности, а также спросу на недорогие материалы в период быстрого экономического роста. Расширение системы автомобильных дорог в 1950-х и 1970-х годах создало потребность в долговечном материале, который выдерживал бы суровые условия окружающей среды, как, например, дороги, подверженные воздействию противогололедной или морской соли. В настоящее время одним из альтернативных материалов являются армированные стекловолокномполимеры (стеклопластик). Хотя на стеклопластик обращали незначительное внимание, работа над поиском возможных вариантов использования волокнисто-армированных полимеров (ВАП) продолжалась. В последние тридцать лет ВАП используются в мостах, больницах, требующих

неметаллического армирования, химических хранилищах и даже ферменных конструкциях [74]. ВАП могут выпускаться в пултрудированной форме, типичной для таких элементов, как балки, стержни, швеллеры и трубы. Одним из основных препятствий, стоящим на пути более широкому применению ВАП, является озабоченность относительно поведения материала и его долговечности. Дальнейшее изучение и исследования реальных примеров использования ВАП поможет развеять опасения и открыть дорогу этим материалам в инженерный "инструментарий" будущего.

Для защиты от коррозии и проникновения хлоридов предусмотрены минимумы по защитному слою, ограничения по ширине трещин и нормативные требования к специальным бетонным смесям. Хотя они действительно помогают защитить арматуру, коррозия в какой-то степени неизбежна. Простым решением здесь является использование базальтового волокна в качестве альтернативы конструкционной стали при проектировании и строительстве в будущем. Более высокие первоначальные затраты на эти материалы оправдываются снижением затрат на их техническое обслуживание и мониторинг, а также потенциально более длительным сроком службы.

Наиболее распространенные типы ВАП изготавливаются из непрерывных волокон арамидов (арамидопластик), базальта (базальтопластик), углерода (углепластик) или стекла (стеклопластик). Стержни ВАП анизотропны и состоят из волокон, изготовленных из соответствующего материала, и смоляной матрицы. Волокна обычно расположены продольно, чтобы использовать высокую прочность материалов на растяжение. Эти волокна обеспечивают жесткость и прочность композиционных материалов и оказывают существенное влияние на механические свойства арматуры. Так механические свойства материала, используемого для создания волокон, будут проявляться в механическом поведении композита. Смоляная матрица защищает волокна и служит для скрепления волокон вместе, что позволяет равномерно распределять напряжение между ними, а также между арматурой и бетоном. В силу того, что ВАП обладают сложной структурой, с их

долговечностью не так все просто, как с коррозией стали: деградация может происходить в смоле или в волокнах или в их поведении в межфазном взаимодействии [74].

В Нигерии множество материалов используются в качестве легких заполнителей для бетона. Эти материалы характеризуются индивидуальными и общими для всех легких заполнителей свойствами. Такие материалы, как макулатура [54], голубой глинистый сланец, пальмовое ядро, побочные продукты промышленные, глина и т. д. Учитывая стоимость закупки и низкую доступность большинства легких материалов, целесообразно использовать керамзитовый заполнитель для легкого бетона. Хотя в настоящее время в Нигерии нет керамзитового производства, сырье имеется в изобилии.

Керамзит - это легкий заполнитель, получаемый путем обжига глины при температуре примерно до 1,200 °C (2190 °F) во вращающейся печи. Образовавшиеся газы расширяют глину, образуя во время нагревания тысячи пузырьков и создавая таким образом пористую структуру. Керамзит имеет округлую или картофелеобразную форму за счет кругового движения в печи, выпускается разных размеров и разной плотности.

Базальтовые волокна изготавливаются из базальтовых пород, которые являются наиболее распространенным типом горных пород в земной коре. Базальтовые волокна изготавливаются из расплавленной породы, которая затем экструдирована через фильеры для получения непрерывного базальтового волокна. Производственный процесс требует меньше энергозатрат по сравнению с другими ВАП, а сырье широко распространено по всему миру. В производстве базальтового волокна не используются никакие добавки, что делает его экологически чистым. Эти аспекты производства дают базальтовому волокну определенное преимущество по стоимости перед другими широко используемыми ВАП.

Модуль упругости базальтового волокна низок по сравнению с углеродным и арамидным, что является недостатком с точки зрения упрочнения при изгибе.

Однако предельная деформация растяжения высока, что делает его перспективным для модернизации колонн с целью повышения их сейсмических характеристик.

Базальтовое волокно и керамзит - материалы, которые демонстрируют значительную твердость, прочность на растяжение, на сжатие и ударную вязкость. Механические свойства стали как стандартной бетонной арматуры и гранита как заполнителя тщательно изучены и зафиксированы документально. Но в Нигерии очень мало или вообще нет данных, описывающих характеристики керамзита и базальтового волокна и стержней. Таким образом, остается большой простор для создания существенного вклада в сбор данных о физико-механических свойствах базальтового волокна, базальтовой арматуры и керамзита, что будет обсуждаться более детально в экспериментальных результатах главы 4 настоящей диссертации.

1.2 Обзор литературы на аналогичные темы

В данном разделе диссертации дано описание современного уровня знаний о прочностных и деформационных характеристиках, коррозионной стойкости и трещиностойкости конструкций из облегченного керамзитобетона с армированием базальтовой фиброй и базальтовой арматурой. Также дан анализ эффективности керамзита, базальтового волокна и базальтовых стержней. В разделе упоминается ряд экспериментальных и технических работ, в которых рассматривались подобные вопросы.

В последние два десятилетия волокнисто-армированные полимерные (ВАП) материалы успешно применяются в гражданском строительстве для армирования бетонных конструкций с целью преодоления проблем коррозии и долговечности [37,39,144]. ВАП-материалы имеют много преимуществ перед стальной арматурой, таких как легковесность, высокие удельные коэффициенты прочности и жесткости, коррозионная стойкость и нейтральность к электрическим и магнитным возмущениям [29,30,67,68].

1.2.1 Армирование

Рубленое базальтовое волокно

В производстве базальтового волокна не используются никакие добавки, что делает его экологически чистым. Эти аспекты производства дают базальтовому волокну определенное преимущество по стоимости перед другими широко используемыми ВАП. Модуль упругости базальтового волокна низок по сравнению с углеродным и арамидным, что является недостатком с точки зрения упрочнения при изгибе. Однако предельная деформация растяжения высока, что делает его перспективным для модернизации колонн с целью повышения их сейсмических характеристик. Несколько исследований показали, что базальтовое волокно является хорошей заменой стекловолокну с точки зрения прочности, деформации разрушения, коррозионной устойчивости и стоимости [22,138,159,152,156].

Свойства рубленого базальтового волокна. Базальтовые волокна характеризуются хорошей устойчивостью как к низким, так и к высоким температурам и имеют более высокие эксплуатационные характеристики по сравнению с другими волокнами с точки зрения термостойкости, звукоизоляции, виброустойчивости и долговечности. С точки зрения технических характеристик базальтовое волокно стоит между углеродным волокном и стекловолокном, но и стоя между ними оно имеет важное преимущество: отличную совместимость с углеродным волокном. Эта особенность позволяет создать высокоэффективный гибридный материал путем добавления небольших количеств углеродных волокон к базальтовым [57]. Полученная проволока, незначительно отличающаяся по стоимости (из-за малого содержания углеродного волокна, более дорогого), демонстрирует значительно лучшую упругость, чем "одно-волоконный" базальт (заметим, что модуль упругости базальтового волокна составляет около 11 000 кг/мм², в то время как у углеродного - 22 000-56 000 кг/мм²). Однако стекловолокно [6, 114] по своей форме и химическому составу может рассматриваться как

эталонный материал для лучшего понимания свойств базальтовых волокон. Они оба неорганические, но способы производства разные. Базальтовые волокна, как известно, производятся из базальтовых пород, которые плавятся при температуре 1400°. Базальтовые волокна в силу своих природных свойств и характеристик считаются экологически безопасными, нетоксичными, обладают высокой стабильностью и высокими изоляционными характеристиками [107].

Рубленое базальтовое волокно - это относительно новый армирующий материал, обладающий отличными механическими свойствами и экологически чистым производственным процессом. В работе Y. Xie, J. Deng и L.G. Huang [161], C. High, H.M. Seliem, A. El-Safty, S.H. Rizkalla [91], P. Iyer, S. Kenno, S. Das [96], ACI Committee 544 [50], Ф.Н. Рабинович [36], V.V. Galishnikova, M. Kharun, D.D. Koroteev, P.C. Chiadighikaobi [85], М. Харун, Д.Д. Коротеев, П. Дхар, С. Ждеро, Ш.М. Елроба [40] большая часть исследований базальтофибробетона была сосредоточена на его механических свойствах.

Рубленое базальтовое волокно имеет следующие физические характеристики:

- Цвет: - доступен в золотисто-коричневом цвете.
- Диаметр: - доступен различный диаметр, например 5.8 микрона.
- Длина: - бывает 6мм, 8мм, 12мм и т. д.
- Плотность: - плотность базальтового волокна составляет 2.75 г/см³.
- Коэффициент трения: - коэффициент трения может составлять от 0.42 до 0.50.

Рубленое базальтовое волокно имеет следующие химические свойства:

- Базальты более устойчивы в сильных щелочах (устойчивы к щелочам).
- Потеря веса в кипящей воде, щелочи и кислоте также значительно ниже.
- Обладают устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, биологическому и грибковому загрязнению.
- Совместимы с фенольными смолами.

- Поглощение влаги ниже [129].
- Устойчиво к воздействию кислот и агрессивных химических веществ.
- Отсутствие канцерогенного риска или других опасностей для здоровья.
- Полностью инертно, нет каких-либо экологических рисков.

Термические свойства рубленого базальтового волокна. С тепловым диапазоном от $-260\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $982\text{ }^{\circ}\text{C}$ и температурой плавления $1450\text{ }^{\circ}\text{C}$, а также низкой теплопроводностью $0,031 - 0,038\text{ Вт/мК}$ базальтовые волокна идеально подходят для противопожарной защиты и изоляции. Базальтовые волокна наиболее экономичны по сравнению с другими высокотемпературными материалами, включая Е-стекло, кремнезем, керамику, нержавеющую сталь и углерод, предотвращая быстрый перегрев и увеличивая ресурс тормозов. Дает в три раза более высокую термическую эффективность, чем асбест, без опасности для психического и физического здоровья. Базальтовое волокно - лучшее решение для замены асбеста. Базальтовое волокно негорючее и взрывозащищенное. Прочность базальтовых волокон при нагреве до $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ снижается незначительно от ее начальных параметров, в то время как Е-стекло теряет более 50% [129].

Рубленое базальтовое волокно имеет следующие механические свойства:

- Удельная прочность (отношение предела прочности материала к его плотности) базальтовых волокон во много раз превышает аналогичный показатель стальных волокон.
- Базальтовые волокна не капиллярны и не гигроскопичны, что выражается в высокой влагостойкости.
- Содержание твердых вкраплений в базальте, как правило, не превышает 3% [129].
- Высокая прочность на растяжение. Прочность на растяжение базальтопластиковых арматурных пучков приблизительно в два раза выше данного показателя для стальной арматуры, а их удлинение при разрыве намного больше, чем у стали.

- Высокий модуль упругости обеспечивает превосходную удельную прочность, в три раза превышающую прочность стального волокна (у базальта $E=60-80$ ГПа, в то время, как у стали $E=200$ ГПа).
- Высокая усталостная стойкость.
- Электромагнитная устойчивость.

Базальтовая арматура

Базальтовая арматура - изделие из базальтового волокна. Это стержни с непрерывным спиральным оребрением, изготовленные методом намотки высокопрочной базальтовой ленты, промасленной в полимерном компаунде. Базальтовая арматура - широко используемый в строительстве композитный материал. Арматура устойчива к коррозии и воздействию агрессивных химических соединений, легковесна и долговечна. Результаты исследований показали, что долговечность конструкций, в которых была использована базальтовая арматура, значительно превышает долговечность аналогичных конструкций с применением других материалов.

Базальтовая арматура обладает уникальными техническими характеристиками, передающимися самим бетонным конструкциям.

Базальтовая арматура имеет следующие технические характеристики:

- Базальтовые арматуры в 3 раза прочнее стальных (от 800 до 1400 МПа в зависимости от диаметра, тогда как у стальных от 360 до 400 МПа) [147].
- Базальтовые арматуры в 4 раза легче стальных при том же диаметре и в 7-9 раз легче стальных стержней той же прочности.
- Базальтовые арматуры обладают высокой коррозионной стойкостью.
- Обладают низкой теплопроводностью.
- Не гигроскопичны.
- Не проводят электричество.
- Не требуют сварки на площадке.
- Связаны обычной вязальной проволокой или пластиковыми хомутами.

- Благодаря тому что базальтовое волокно обладает той же теплопроводностью, что и бетон, повышается долговечность и всей цементно-бетонной конструкции в целом.

БФАП, как и любые иные ФАП, изготавливаются с тем, чтобы работать как арматура на растяжение. БФАП обладает исключительными свойствами по растяжению (см. таблицу 1.1 по данным, предоставленным производителями Smarter Building Systems).

Таблица 1.1 - Прочностные характеристики БФАП-арматуры (ГОСТ 31938-2012) [12]

Размеры арматур	Диаметр (дюймы)	Прочность на растяжение (ksi)	Модуль упругости на растяжение (ksi)
2	0,250	127	6686,24
3	0,375	123	6700,74
4	0,500	115	6729,75
5	0,625	99	6990,82
6	0,750	95	6903,80
7	0,875	91	6729,75
8	1,000	89	7396,92
10	1,270	80	6091,58

Базальтовая сетка

В строительстве используется и такой современный арматурный материал, как базальтовая сетка. Как и многие другие армирующие композитные материалы, эта сетка имеет в основе неметаллические волокна. Поставляется в рулонах. Обеспечивает отличное укрепление конструкций [147,12,31]. Базальтовая сетка отличается от стальной по ряду параметров.

Базальтовая сетка - это новейший строительный материал. Сетка не проводит тепло, не подвержена коррозии, воздействию щелочей и низких температур. Как и у стеклопластика, срок службы базальтовой сетки составляет более 80 лет.

Производители выпускают эту продукцию по индивидуальному запросу. Базальтовая сетка характеризуется своими точными размерами и идеальной геометрией. Она применяется для усиления несущей способности, укрепления швов кладки, балок, перекрытий, гофров. При армировании конструкций, потенциально подверженных химическому воздействию, имеет смысл использовать именно этот материал - он действительно устойчив к агрессивной среде.

Преимущества базальтовых материалов. Базальтовый материал признан наиболее перспективным строительным материалом на сегодня. Его преимущества выражаются в экономичности и общих эксплуатационных качествах. Учитывая состояние мировой экономики в последние годы, очень важно, чтобы инженерами-строителями использовались высококачественные, но доступные по цене конструкционные материалы. Поиски такого прочного высококачественного материала привели к тому, что мы обратились к базальту. Из сказанного выше можно сделать вывод, что базальт представляет собой возможную экономическую и инженерную замену другим строительным материалам. Это подразумевает под собой стоимость транспортировки, производства, оплату рабочей силы на объекте и т. д. Удостоверившись в экономических преимуществах базальтовых материалов инженеры обращаются к рассмотрению таких их эксплуатационных характеристик, как общее доверие к сооруженным с их использованием конструкциям, оценку экологической безопасности, включая возможные последствия землетрясений, возгораний, взрывов и т. д. Уровень эксплуатационных качеств базальта лучше всего характеризуется его способностью противостоять вызовам окружающей среды, возможностью его вторичной переработки и доверием инженеров и конечных пользователей созданных с его использованием конструкций. Основная проблема из области строительства, с которой сталкиваются сегодня нигерийцы, - это добыча качественных, прочных конструкционных материалов по доступным ценам, когда при этом то, что будет происходить в ближайшем будущем с окружающей средой - не рассматривается. Недавними примерами таких экологических катастроф стали:

землетрясение 12 января 2010 года, магнитудой 7,3, опустошившее Гаити. Погибло более 230 тысяч человек. Еще 300 000 человек получили ранения [60]; а землетрясение магнитудой 9,0 в марте 2011 года вызвало мощное и смертоносное цунами, которое обрушилось на электростанцию и вызвало самую страшную в мире атомную аварию со времен Чернобыля (1986) [114]. Землетрясения могут не убивать непосредственно, но что убивает больше, так это разрушения, которые они вызывают. Масштабы разрушений объектов таких, как здания, плотины, захоронения отходов, ландшафты - можно минимизировать или, по крайней мере, контролировать. Поэтому, прежде чем обратиться к вопросу возведения сооружения в Нигерии, целесообразно рассмотреть вопрос о способности конструкционных материалов противостоять экологическим катастрофам. Жители Нигерии не должны начинать вникать в суть вопроса, когда катастрофа уже произойдет. Они должны извлечь уроки из того, что уже произошло в названных странах, эти землетрясения и другие бедствия. Результаты проведенных учеными исследований показали, что базальтовые материалы способны противостоять особо опасным катастрофам. Ниже мы подробно рассмотрим свойства и то, как работают эти материалы

1.2.2 Керамзит

Керамзитовые заполнители используются в различных отраслях промышленности в силу их технических характеристик и многочисленных преимуществ в сравнении со многими другими видами промышленного сырья. Керамзит - один наиболее прочных на сжатие материалов среди легких заполнителей [153].

Сырье, используемое для производства керамики, при спекании при высоких температурах выделяет газ, что приводит к расширению объема за счет схлопывания пузырей [44]. Основным преимуществом использования легких компонентов является снижение общего веса конструкции, что имеет решающее значение для проектирования конструкции, особенно при расчете силы

землетрясений. Кроме того, пористый характер легких кирпичей позволяет повысить качество конструкций с точки зрения тепло-и звукоизоляции [132].

Керамзит - природный и экологически чистый изоляционный материал, фракцией от 0,14 мм до 40 мм. Материал получают путем обжига специальных сортов глины в высокотемпературных печах. Этот керамзит известен как легкий наполнитель. Керамзит экологически безопасен, не разлагается, устойчив к воздействию влаги и открытого пламени, обладает хорошей тепло - и звукоизоляцией.

Легкий наполнитель из вспученной глины получают обжигом исходного материала при температуре до 1050°C [146]. Легкий наполнитель обладает удачным свойством постоянства объема при воздействии температур до 1050°C, что говорит об их пригодности в строительстве с повышенным риском возгорания [69].

Этот пористый материал является одним из наиболее эффективных для теплоизоляции, пользуется большим спросом в производстве строительных материалов (керамзитобетон, легкий бетон и др.) и в утеплении жилых зданий (утепление столбчатого фундамента, перекрытий на первом этаже дома и др.). Основными свойствами являются фракция зерна, насыпная плотность и прочность.

У керамзитного гравия размер фракций - от 5 до 10 мм. Он используется в качестве наполнителя при производстве легкого бетона, при теплоизоляции горизонтальных поверхностей - крыш и на полов [21].

Сфера применения керамзита в строительстве сегодня чрезвычайно широка. Основным назначением материала является утепление конструкций при строительстве, а также снижение веса строительных материалов без потери прочности. См. ниже объемные характеристики утеплителей в Таблице 1.2 и технические характеристики керамзита в Таблице 1.3, данные из работы [21].

Теплопроводность керамзита по фракциям. Керамзит делится по фракциям гравия: 5-10 мм; 10-20 мм; 20-40 мм и песок (0-5 мм). По плотности и прочности гравий делится на марки от М300 до М700 [21,14]. Эти цифры указывают объемную плотность, но не указывают на прочность материала или его

теплопроводность. Технические характеристики керамзита по прочности и насыпной плотности приведены ниже:

- i. Фракция 20-40 мм (М300 - М380) - марка прочности гравия П50 - П75.
- ii. Фракция 10-20 мм (М400 - М450) - марка гравия прочности П75 - П100.
- iii. Фракция 5-10 мм (М500 - М550) - марка прочности гравия П100 - П125.
- iv. Фракция 0-5 мм (М600 - М700) - марка прочности гравия П50 - П75.

Марка (М) керамзитного гравия определяется по насыпной плотности в кг/м³.

Таблица 1.2 - Характеристики керамзита фракции 5-10 мм [21]

Марка по насыпной плотности	Марка по плотности	Прочность при сдавливании в цилиндре (МПа)	
		Керамзитный гравий	Керамзитный щебень
500	П100	2,3	1,5
550	П125	3,1	1,9

Таблица 1.3 - Технические характеристики керамзита

Показатель	10-20мм	5-10мм	0-5мм
Насыпная плотность, кг/м ³	280-370	300-400	500-700
Прочность при сжатии, Н/мм ² (МПа)	1.0-1.8	1.2-2.0	3.0-4.0
Грохочение, %	4	8	0
Устойчивость к морозам 20 циклов, потеря гравийной массы, %	0.4-2.0	0.2-1.2	не регламентируется
Процент раздавленных частичек, %	3-10	3-10	Нет
Теплопроводность, Вт/мК	0,0912	0,0912	0,1099
Водопоглощение, мм	250	250	290
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов, Бк/кг	270	270	290

1.2.3 Анализ рассматриваемого вопроса

В данном разделе анализируются различные области применения облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй и в - некоторых случаях - обычного базальтобетона.

Армирование бетонной конструкции

Бетон - это смесь цемента, заполнителей и воды. В последнее время в бетон добавляют новые композиционные материалы для повышения прочности бетона при строительстве [4,24]. Примером такого композиционного материала является базальтовая фибра. Цемент является одним из основных источников парниковых газов [63]. Повышение уровня минеральных добавок в цемент до 10% может способствовать снижению уровня выбросов углекислого газа [160]. Благодаря этому можно ежегодно сокращать выбросы углекислого газа на 375 000 - 750 000 тонн без каких-либо неблагоприятных последствий для эксплуатационных характеристик производимого бетона. Бетон - самый универсальный из строительных материалов [109,2]. Он обладает хорошими эксплуатационными характеристиками во многих отношениях, такими как прочность, долговечность, износостойкость, огнестойкость и т.д. Наиболее важным компонентом бетона является вяжущее вещество, чаще всего это цемент. Бетон позволяет проектировать очень прочные и долговечные здания, используя преимущества своей термальной массы, удерживая ее внутри ограждающей конструкции и регулируя таким образом внутреннюю температуру. Увеличение использования сборного бетона в строительной промышленности дает преимущества с точки зрения воздействия на окружающую среду, стоимости, устойчивости и скорости строительства.

Реконструкция традиционного бетона с использованием современных базальтоволоконистых армирующих материалов

Представление об использовании бетона для возведения конструкций очевидно дает сравнительное исследование работ некоторых экспертов. Бетон широко используется в объектах гражданской и военной инфраструктуре. В

настоящее время это наиболее широко используемый строительный материал - большинство конструкций содержат бетон. Помимо статической нагрузки, в период эксплуатации бетонные конструкции неизбежно будут испытывать динамическую нагрузку от таких событий, как землетрясение, взрыв и удар; кроме того, различные защитные сооружения уязвимы для артиллерийских обстрелов и взрывов [51,109,166]. Обычный бетон демонстрирует хрупкость из-за своей слабой устойчивости к растрескиванию. При воздействии ударной нагрузки обычный бетон как правило демонстрирует высокую разрушаемость, что приводит в дальнейшем к серьезным проблемам безопасности в таких конструкциях. Воздействие окружающей среды проявляется, когда соленая, кислая или обычная почвенная вода достигает стали внутри конструкции; это вызывает коррозию и трещины в бетоне. Но известно, что для эксплуатационной надежности необходимы неагрессивные, немагнитные и неэлектрические свойства. Поэтому в последнее время потребовалась замена традиционной стальной арматуры [140,123,110,78]. Устойчивость к дефектам традиционного бетона значительно повысилась за счет использования волокон в качестве армирующих материалов [140].

Было установлено, что эффективные меры, повышающие ударопрочность бетона, обычно включают добавление в него волокон. Эти дисперсные волокна в бетоне могут эффективно предотвращать образование и распространение трещин своим перекрывающим действием и значительно повышать вязкость бетона, тем самым повышая его ударопрочность [58]. Также было замечено, что использование волокон изменяет вязкоупругие характеристики смеси [117], повышает ее динамический модуль [95], обеспечивает чувствительность к влажности, позволяет оптимизировать подвижность смеси и увеличивает сопротивление колейности [72].

Прочность на сжатие бетонных колонн, армированным базальтоволокнистым полимером

Колонны - это основной несущий элемент конструкции. Таким образом, колонны играют важную роль во многих конструкциях и могут быть уязвимы к

особым нагрузкам. По мере старения конструкций колонны часто испытывают недостаток поперечного армирования, которое уже не в состоянии обеспечить достаточное внешнее усиление бетонного сердечника или предотвратить прогиб продольной арматуры, что приводит к безвременному снижению прочности колонны. Исходя из этого, работы Р.С. Chiadighikaobi [76], Д.Ю. Попов [34] имеют основной целью исследование поведения аксиально нагруженных бетонных колонн, снаружи усиленных малоизвестным в гражданском строительстве материалом - базальто-фибро-армированной полимерной рубашкой. Исследование представляло собой программу испытаний бетонных блоков, снаружи усиленных базальто-фибровым полимером, и тестирование их прочности на сжатие. Результаты испытаний показывают, что повышение прочности бетонных блоков связано с их более дуктильным поведением.

Согласно с работой А. Nanni и N.M. Bradford [121], обертывание базальтовой сеткой бетонных колонн является перспективным методом усиления и ремонта конструкций в силу ее уникальных свойств в плане прочности, легкости, химической стойкости и простоты применения. Этот способ упрочнения представляет практический интерес благодаря быстрой реализации и низким трудозатратам. Покрытие обеспечивает пассивное внешнее усиление бетонного сердечника и противодействуют поперечному расширению колонны при сжатии, что сдерживает ослабление бетона и, как было показано, повышает как прочность, дуктильность колонн, так и их способность противостоять экстремальным экологическим опасностям, таким как землетрясения, возгорания и т. д. [121]. С момента начала разработки ВАП-обертывания в 1980-х годах M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi [128], M. Demers и K.W. Neale [80], S. Matthys, H. Toutanji, K. Audenaert, L. Taerwe [116] проделали большие экспериментальные и аналитические работы с образцами бетонных круглых колонн и позже - колонн квадратного и прямоугольного сечения. Экспериментальные работы в основном были сосредоточены на популярных на рынке армированных волокном полимерных материалах - угле-, стекло- и арамидопластке. Базальто-фибро-

армированные полимеры (БФАП) - новый материал в гражданском строительстве в сравнении с углеродом, стеклом и арамидами, но который уверенно зарекомендовал себя как перспективный материал в упрочнении объектов инфраструктуры. Базальтовое волокно обладает сопоставимыми со стекловолокном механическими характеристиками при воздействии низких температур [116,29]. Предельная деформация БФАП выше по сравнению с другими распространенными ФАП-материалами. В этой связи представляется интересным использовать это преимущество при упрочнении колонн для повышения их сейсмических характеристик. Несмотря на то, что базальтовые материалы появились достаточно давно, исследований по их применению в гражданском строительстве и их эффективности при упрочнении бетонных элементов - совсем немного.

Комплексный взгляд на дуктильность базальтового фибробетона. В центре внимания легкий керамзит

Интересным свойством базальто-фибро-армированного бетона (БФАБ) является его дуктильность. Однако задокументировано очень немного экспериментов по исследованию данного свойства. В работе В.В. Галишникова, П.Ч. Чиадигхикаоби, Д.А. Эмири [7] всестороннее исследование дуктильности базальто-армированного бетона заложило основу для проведения полноценного лабораторного эксперимента по дуктильности базальто-фибро-армированного бетона. Из результатов работы следует, что дуктильность армированного дисперсной базальтовой фиброй бетона зависит не только от процентного содержания БФ, но и от длины и диаметра БФ. Увеличение процентного содержания БФ в бетоне приводило к увеличению его дуктильности.

Дуктильность может быть определена как мера способности материала пластически деформироваться без разрушения при нагрузке на растяжение, превышающей предел текучести. Дуктильность сильно зависит от химического состава материала, его кристаллической структуры и температуры, при которой она измеряется. Термин дуктильность (податливость) в сейсмическом

проектировании можно понимать как способность конструкции претерпевать циклические деформации большой амплитуды в области упругости без существенного снижения прочности. Дуктильные структуры примечательны своей способностью рассеивать значительное количество энергии во время этих циклических деформаций.

Поэтому для понимания эффективности БФ при циклическом нагружении в соединении балка-колонна определение дуктильности имеет критическое значение [133]. Дуктильность также может быть выражена формулой с использованием диаграмм нагрузки-прогиба или момента-кривизны. Для профилей армированного бетона дуктильность может быть выражена в виде дуктильности кривизны μ_ϕ [16] (см. 1.1).

$$\mu_\phi = \frac{\phi_u}{\phi_y}, \quad (1.1)$$

где ϕ_u - кривизна в предельном случае, когда натяжение бетона достигает заданного предельного значения; ϕ_y - кривизна, когда натяжение арматуры впервые достигает предела текучести. Они проиллюстрированы на рисунке 1.1. Кривизна в общем случае может быть определена выражением (1.2):

$$\phi = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{h}, \quad (1.2)$$

где ε_1 и ε_2 - натяжение вверху и внизу сечения высотой h .

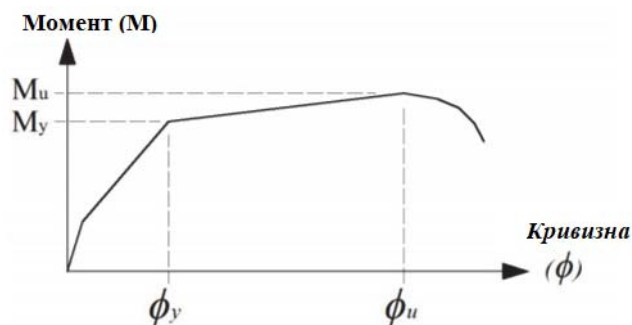


Рисунок 1.1 - Определение дуктильности [16]

В экспериментальных исследованиях S. Monjusha, R. Biswajit, A.M. Ruhul, I.L. Aminul [118] смещение предела текучести определялось с помощью метода уменьшенной жесткости как инструмента теории упругопластического течения.

Уменьшенная жесткость рассчитывалась как секущая жесткость при 75% нормативной нагрузки [126]. Постпиковое смещение, когда несущая способность уменьшалась на 20%, рассматривалось как предельное смещение [118]. На рисунке 1.2 показана дуктильность всех исследуемых базальтофибровых образцов. Было обнаружено, что дуктильность образцов БФАБ, содержащих 1 и 2% фибры ниже на 19 и 38% по сравнению с соответствующими образцами, армированными стальной фиброй. Примечательно, что предельное смещение для образцов обоих типов при соответствующих процентах содержащейся фибры оказалось одинаковым, но у образцов с базальтовой фиброй более высокое смещение предела текучести по сравнению с образцами со стальной фиброй (СФ1 и СФ2). Это, в свою очередь, снижало дуктильность образцов БФАБ.

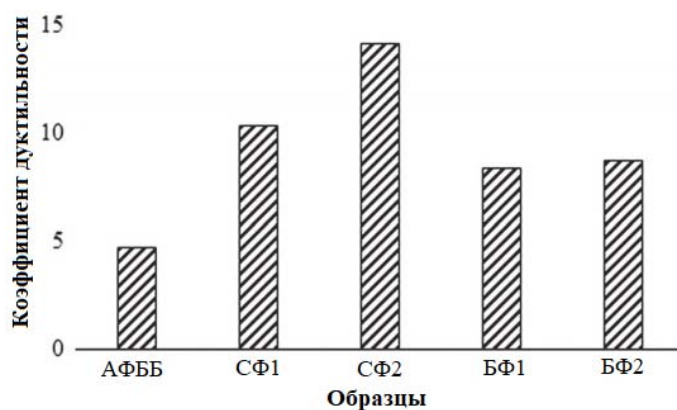


Рисунок 1.2 - Коэффициент дуктильности испытуемых образцов

Цель армирования волокном заключается главным образом в повышении прочности бетона на растяжение и сдерживанию образования трещин, а также в повышении ударной вязкости за счет передачи напряжений через трещиноватый участок [17]. Без армирования волокном возможна деформация за пределами пикового напряжения, см. рисунок 1.3 [81]. Волокна обеспечивают фибробетону дуктильность после образования трещин [99].

В статье А.Е.А. Elshekh, N. Shafiq, M.F. Nuruddin, A. Fathi [81] показано, что вопросы долговечности и дуктильности материалов с большой плотностью стальной арматуры привели к пониманию необходимости разработки альтернативных способов армирования такого бетона. В качестве материала для упрочнения бетона было исследовано волокно и различные способы его

применения, такие как наружное и стержневое армирование. Выбор обусловлен высоким вкладом армирующего волокна в механические свойства высокопрочного бетона, такие как высокая прочность на сжатие, ударная вязкость и дуктильность [91, 33, 112].



Рисунок 1.3 - Диаграмма деформации в следствие напряжения для неармированного бетона и фибробетона [56]

В работе К. Hannawi, Н. Bian, W.P. Agbodjan, В. Raghavan [89] рассматривается использование базальтовой фибры в качестве добавки в бетон с наблюдаемым последующим значительным ростом прочности на изгиб и небольшим повышением прочности при сжатии. Аналогичные исследования также проведены в работах АСI 213R-87 [48], С. Hong Zhi [93], С.G. Koh, M.Q. Teng, Т.Н. Wee [103], В.А. Перфилов, М.О. Зубова [33], Т.Ф. Шляхтина [42], М. Kharun и D. Koroteev [99], M.J. Muyasser, H.A. Daham, M.R. Saad [120] в которых было установлено, что добавление базальтовой фибры в бетон повышает дуктильность, модуль упругости, прочность на изгиб, прочность на раскалывание и ударную вязкость. В последнее время легкий бетон не считается особенный материал, поскольку в настоящее время он включен во многие строительные нормы и правила, например Американского институт бетона (American Concrete Institute) [48,50]. В отличие от стандартного бетона высокого качества легкий бетон обладает меньшей плотностью и большей податливостью. Свойства легкого бетона как материала и его механические характеристики прояснены уже давно, но продолжают вызывать интерес, как показано в работах С. Abdelhamid, M.S. Jamal, D. Saleh [45], S.H. Ahmad, Y. Xie, T. Yu [52], В. Arisoy и H.C. Wu [61].

В работе Н.Т. Wang и L.C. Wang [154] были представлены аналитические и экспериментальные результаты по дуктильности армированных легких бетонных балок и колонн в виде зависимостей момента-кривизны, и проведено сравнение отклика с откликом элементов из стандартного бетона высокого качества. В экспериментальной части исследования работа ограничивается испытаниями на изгиб балок из легкого бетона. Последний получают с использованием природных легких заполнителей. Далее в исследовании легкие бетонные балки и колонны показали более дуктильное поведение, чем элементы из обычного бетона, и аналитическая модель воспроизвела отклик с очень хорошей точностью. Анализ показал, что дуктильность облегченных элементов была более выражена в колоннах, подвергнутых осевому сжатию и изгибу.

Высокая прочность легкого бетона обращается повышенной хрупкостью, поэтому имеет смысл рассмотреть армирование волокном для повышения прочности и дуктильности. Показатель дуктильности μ при сдвиге и изгибе определяется как отношение значений площадей пиков нагрузки-прогиба. Дуктильность сдвига следует измерять только по деформации сдвига S. Arivalagan [62]. Объемная доля волокна 1,5% или выше обеспечивает деформационное упрочнение быстрее, чем более низкие объемные доли. За счет добавления 10-20% летучей золы и кремнеземистых заменителей цемента повышаются дуктильность и прочность на изгиб облегченного фибробетона. Это приводит к увеличению на 50-150% изгибной деформации (дуктильности) при предельной нагрузке [45].

Дуктильность фибробетона с легкими заполнителями обусловлена усиленной трещиностойкостью, обеспечиваемой перекрытием фиброй слоев бетона [151,145,5]. Можно сделать вывод, что добавление фибры в легкие бетонные смеси повышает прочность бетона на сжатие на 20%, прочность на растяжение на 80% и прочность на изгиб - на 90% [125].

Прочность на сжатие базальтофибробетона в сравнении с керамзитом с гравием в качестве заполнителя

На прочность бетона на сжатие влияют параметры и доля базальтового волокна. В работе Z. Wu, X. Wang, G. Wu [155], С.П. Оснос, Е.В. Краюшкина, Т.Ю.

Химерик [32], М.Ю. Лещинский, Б.Г. Скрамтаев [26] проведены испытания кубических и цилиндрических бетонных образцов, в которых определялась средняя прочность на сжатие трех образцов, смешанных с базальтовой фиброй и без нее, на 7, 14 и 28 день. Результаты работы J. Wang и Y. Zhang [155] показали, что средняя прочность на сжатие образцов базальтофибробетона была выше, чем прочность на сжатие образцов обычного бетона на 7, 14 и 28 день.

В исследовании J. Chaohua, F. Ke, W. Fei, Ch. Da [75] объяснили вариацию прочности бетона на сжатие различным содержанием базальтовой фибры, от 0,1% до 0,5%. Прочность бетона на сжатие повышается с увеличением содержания базальтовой фибры до 0,3%: после этого прочность бетона на сжатие имеет тенденцию постепенно снижаться, в итоге - на 12%. Авторы объяснили, что это происходит из-за снижения когезии между цементной пастой и заполнителем, что играет важную роль в прочности бетона на сжатие.

В работе J.A. Bogas, M.G. Gomes, A. Gomes [70] исследовал влияние использования различной базальтовой фибры, длиной 12мм и 24мм, на прочность бетона на сжатие, используя кубический образец с размерами 100x100x100мм. Автор испытал в общей сложности 126 образцов бетона: 18 из них не были армированы, а 108 были армированы базальтовой фиброй. Результаты анализа показали, что прочность бетона на сжатие увеличивается на 58% при армировании бетона базальтовой фиброй длиной 12 мм и на 25% - при армировании бетона базальтовой фиброй длиной 24 мм. Исследования в M.G. Alexander, G. Arliguie, G. Ballivy, A. Ventur, J. Marchand [56] показали, что при увеличении содержания базальтовой фибры в бетонной смеси прочность бетона на сжатие снижается в испытаниях бетона через 7 дней. Далее авторы в своем объяснении заявили, что в испытании бетона на прочность через 28 дней прочность бетона на сжатие увеличивается с увеличением содержания базальтовой фибры до достижения максимального значения при содержании фибры в 0,1%.

В работе J.J. Shideler [135] показало, что по сравнению с обычным бетоном, бетон, армированный базальтовой фиброй, обладает высокой прочностью на изгиб

и растяжение. Но прочность на сжатие бетона, армированного базальтовой фиброй, незначительно возрастает на ранней стадии твердения и даже снижается на поздней.

Рассматривая легкий бетон в работе С. Wilson [157], В.С. Семенов, Т.А. Розовская, А.Ю. Губский, Р.Р. Губская [38], прочность на сжатие широкого спектра смесей конструкционного бетона с легким заполнителем оценивается неразрушающим ультразвуковым импульсным методом. В исследовании задействовано около 84 различных составов, испытанных на прочность в диапазоне от 30 до 80 МПа в периодах от 3 до 180 дней. Исследовано влияние ряда факторов на зависимость между ультразвуковым импульсом и прочностью на сжатие. Авторы поясняют, что эти факторы включают тип и состав цемента, количество воды, тип добавки, начальные условия смачивания, тип и объем заполнителя и частичную замену крупнозернистого и мелкого заполнителей обычного веса легкими заполнителями. Установлено, что разные по составу смеси по-разному влияют на легкие и обычные бетоны.

В работе G. Wischers и W. Manns [158] исследовано влияние пористого заполнителя на прочность бетона и влияние предварительного смачивания заполнителя на механические свойства бетона. Эксплуатационные характеристики конструкционного бетона с легким заполнителем могут быть дополнительно изучены для различных составов цемента при постоянном соотношении вода-цемент.

В работе R.L. Carrasquillo [73] достигнута прочность на сжатие легкого бетона, сравнимая с прочностью обычного бетона. Высокие значения прочности на сжатие - до 7000 фунтов на квадратный дюйм - применяются в производстве конструкционных сборных элементов. Однако, как правило, для производства легкого бетона требуется больше мешков цемента на кубический ярд, чем для обычного.

На протяжении многих лет путем тщательного подбора легкого песка и состава смесей были созданы полужелезные цементные растворы, обладающие высокой прочностью на сжатие [90]. Хотя такая прочность не является необходимой для многих строительных решений, есть преимущества в использовании высокопрочного бетона на основе облегченного тампонажного материала при строительстве таких объектов, как морские буровые платформы. Такой легкий бетон обладает большей плавучестью и поэтому легче буксируется на мелководье, а при строительстве сухого дока требуется меньше земляных работ. Есть один пример, когда такой легкий бетон использовался для нефтяных буровых платформ в Арктике [101]. Помимо меньшего веса, что снижает собственный вес конструкций, а тем самым и стоимость как верхней части конструкций, так и фундаментов, этот бетон более устойчив к огню и обеспечивает лучшую тепло-и звукоизоляцию, чем бетон нормальной плотности [127,122,115]. В отношении конструкций из легкого бетона, как и из обычного, существует устоявшаяся тенденция к установлению более высоких значений прочности на сжатие. Это позволяет уменьшить размеры элементов, что, в свою очередь, позволяет дополнительно снизить собственный вес конструкций с сопутствующей экономией затрат, а также расширить полезный диапазон пролетов [111,149,53].

В ходе экспериментального исследования L. Vodnářová, R. Hela, M. Hubertová, I. Nováková [69] изучено влияние различного содержания короткой базальтовой фибры на свойства бетона с легким заполнителем. Результат показал, что с увеличением количества базальтовой фибры, осадка бетона уменьшается; прочность на сжатие увеличивается постепенно до достижения максимума и затем начинает снижаться; прочность на изгиб заметно возрастает, постепенно повышается прочность на изгиб.

Влияние высокой температуры на прочность на изгиб облегченного керамзитобетона с базальтоволокнистым армированием

Легкий бетон обладает рядом выигрышных преимуществ, таких как хорошая прочность на сжатие, долговечность, а также важнейшие преимущества – низкие

плотность и теплопроводность. Даже с экономической точки зрения использование легкого бетона снижает затраты на строительство и упрощает его, а также имеет то преимущество, что этот материал является сравнительно "зеленым" [130].

В работе М.В. Tumadhir [150] исследовано влияние повышенных температур на физико-механические свойства бетона с керамзитовым заполнителем с использованием кальцево-алюминатного цемента. Результаты испытаний показали, что воздействие повышенных температур отрицательно влияет на физико-механические свойства образцов из обычного портландцемента (ОПЦ) с природным заполнителем. Вместе с тем, улучшились эксплуатационные характеристики легких бетонов с керамзитовым заполнителем. Быстрое охлаждение вызывало большую потерю прочности, чем медленное охлаждение.

В исследовании J. Sim, Ch. Park, D.Y. Moon [138] испытываемые образцы подвергались нагреву в соответствии со стандартной температурно-временной кривой ИСО 834. Оценивались негативные изменения в результирующих механических свойствах, таких как прочность на сжатие, прочность на растяжение и прочность на изгиб. Далее, была проведена визуальная оценка образца. В результате исследования обнаружено, что на образцах, подвергнутых чрезмерному нагреву, может наблюдаться взрывное растрескивание из-за испарения большого количества избыточной влаги, содержащейся во внутренней структуре бетона.

Влияние базальтовой фибры в облегченном керамзитобетоне на прочность на сжатие и изгиб

В исследовательской работе А.В. Namadallah и А. Benedetti [88] установлено, что бетонная конструкция, содержащая 0,5% (объемная доля) базальтовой фибры, обладает хорошей обрабатываемостью. Раннюю усадку бетонных конструкций можно значительно уменьшить с помощью базальтовой фибры. Далее в статье объясняется, что добавление определенного количества базальтовой фибры может снизить растрескивание бетона на величину вплоть до 98% за счет высокой устойчивости ее к трещинообразованию. В работах Т.А. Holm и Т.В. Bremner [92], С.В. Ключев [23], М.Т. Абдаллах [1], Н.Г. Василевская, И.Г. Енджиевская, И.Г.

Калугин [3] сделан анализ прочности бетона на сжатие при различном содержании БФ. Исследование показало, что процент содержания БФ в бетоне имеет большое очень большое значение. Далее, в работе FIP manual of Lightweight aggregate concrete [84], А.С. Иноземцев, Е.В. Королев [18], Ю.В. Пухаренко, М.П. Кострикин [35] исследованы трещиностойкость и износостойкость бетонных конструкций с различным содержанием БФ; сделан вывод, что даже незначительное содержание базальтовой фибры способствует повышению вязкости при разрушении, трещиностойкости и износостойкости бетонных конструкций. Испытано влияние содержания БФ на разрушение при сжатии бетонных конструкций (чему в значительной степени способствуют трещины) [159].

Прочность на растяжение при скалывании облегченного керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй

В общем случае прочность бетона на растяжение зависит от прочности на растяжение заполнителя, окружающего раствора и границы раздела заполнителя-пасты [165,65]. С помощью компьютерного моделирования [136] было показано, что прочность на раскалывание керамзитобетона может достигать в лучшем случае самого низкого порога прочности на растяжение его компонентов. Поскольку легкие заполнители обычно имеют более низкую несущую способность, чем окружающий раствор, прочность на растяжение керамзитобетона, как правило, ниже, чем у обычного бетона, изготовленного на основе того же состава.

Кроме того, в некоторых работах сообщается, что керамзитобетон имеет более низкую прочность на растяжение, чем обычный бетон той же прочности [66]. Однако при испытаниях на прочность при раскалывании в соответствии с J. Chaohua, F. Ke, W. Fei, Ch. Da [75] когда образцы влажно отверждались в течение 7 дней, а затем 21 день при относительной влажности 50%, тот же документ сообщает о прочности на растяжение керамзитобетона от 70 до 100% от прочности на растяжение обычного бетона той же прочности. В целом имеются явно противоречивые результаты, что может быть связано с различными типами

заполнителей, уровнями прочности и условиями испытаний, выбранными для каждого отдельного испытания.

В прошлом было проведено несколько экспериментальных исследований, посвященных изучению поведения и механических свойств базальтового и полипропиленового фибробетона. Включение базальтовой фибры в состав бетона показало лучшие результаты по прочности бетона на сжатие, прочность на растяжение при скалывании и прочность на изгиб. С увеличением доли базальтовой фибры уменьшается осадка бетона и несколько повышается прочность на раскалывание [46,4].

Вклад фибры в улучшение механических характеристик бетона в зависимости от типа бетона и размера образца была исследована в работах J.-J. Li, Zh. Zhao [107], С.П. Оснос, Е.В. Краюшкина, Т.Ю. Химерик [32], А.Ф. Грановский, В.В. Галишникова, Е.И. Берестенко [15]. В исследовании использовались керамзитобетон и бетон с известняковым заполнителем, со стальной фиброй и без нее. Прочность бетонной смеси на сжатие варьировалась от 90 до 115 МПа, содержание фибры составляло 1% от объема. Прочность на раскалывание, прочность на изгиб и показатель вязкости у легкого бетона оказываются значительно выше, чем у обычного бетона с заполнителем.

Сравнивая неармированный бетон и бетон, армированный БФ, и тот, и другой обладают высокой прочностью на изгиб и на растяжение. Но прочность на сжатие бетона, армированного базальтовой фиброй, незначительно возрастает на ранней стадии твердения и даже снижается на поздней.

В работе I. Çobanoglu, S.B. Çelik, I. Dinçer, D. Alkaya [79] исследовано влияние базальтовой и полипропиленовой фибры в различной доле; сделано заключение, что прочность на сжатие бетона класса С30 с двумя различными типами фибры при их различной объемной доле снижается по-разному. Авторы показали, что добавление фибры приводило к снижению прочности на сжатие на 0,3%, 0,6%, 0,9% и 1,2% , в то время как у неармированного бетона эти показатели

составили 9%, 19%, 1% и 18% соответственно. Кроме того, было замечено, что включение фибры в бетонную матрицу значительно увеличивает прочность на раскалывание. Добавление базальтовой фибры в величинах 0,3% и 0,6% объема увеличило прочность на раскалывание на 2,6% и 22,9% соответственно; в то время как для добавок в 9% и 1,2% объема прочность на раскалывание бетона снизилась на 11,3% и 19,8% соответственно; таким образом, оптимальная доза базальтовой фибры для повышения прочности на раскалывание находится в окрестностях 0,6%.

Физико-механические свойства облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

Состав бетонной смеси, рекомендуемой для разработки облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй, совершенно отличается от смеси для обычного бетона или широко известной смеси для бетона с легким заполнителем. В рассмотренных выше работах большинство смесей исследовались либо с точки зрения содержания заполнителя, либо объема пасты в бетоне, безотносительно характеристик заполнителя и требований к прочности. Известно, что при проектировании бетонной смеси важны не только прочностные характеристики, но и долговечность бетона. Пористость легкого заполнителя обуславливает пониженную прочность на сжатие, а также препятствует высвобождению из цементного камня избыточной влаги. Исходя из этого, необходимо использовать снижающие пористость добавки. Следовательно, для этого потребуется добавить в смесь каменную муку плюс некоторую часть базальтовой фибры, что поможет снизить пористость и в то же время послужит усилению бетона [134], а также много цементной пасты для достижения соответствующей обрабатываемости и прочности [98].

Керамзитобетон с базальтовой фиброй: устранение структурных дефектов, вызванных проникновением воды

Водопоглощение является одним из важнейших параметров горных пород, оказывающим влияние на их физико-механические свойства [79]. Это важно в

основном для строительных камней, так как влияет на их качество, гигиеничность, эстетический вид и конструкционную безопасность [148,105].

Водопоглощение бетона определяется как доля воды, которая может быть поглощена каменным или другим крупнозернистым бетонным заполнителем при определенных условиях погружения в воду [77]. Негативное воздействие воды на многие физико-механические свойства камня широко известно. Вода размягчает камень, что приводит к снижению прочности камня, а также его истираемости и морозостойкости. Камень с повышенной относительной пористостью и, как следствие, повышенной абсорбцией более чувствителен и, следовательно, менее прочен [124]. Полученная величина дает некоторое представление о эксплуатационных характеристиках камня, в частности о его прочности, долговечности и сопротивляемости деформации.

Керамзит в качестве конструкционного материала, используемого для развития гражданского строительства, улавливает просачивающуюся воду и воду, поднимающуюся по капиллярам из субпластов, и направляет поднимающуюся воду от верхних слоев конструкции, что увеличивает несущую способность [164]. БФ обладает высокой водостойкостью и сохраняет свою прочность после поглощения воды.

1.2.4 Современное состояние строительства в Нигерии и проблемы с коррозией стальной арматуры

В работе V.V. Galishnikova и P.C. Chiadighikaobi [86] исследована эффективность очищенного базальта в нигерийском мире гражданского строительства и проектирования конструкций. В настоящее время ведется поиск композитов нового типа, отвечающих требуемым условиям. Общей проблемой новых типов конструкций из высокоэффективных материалов является вопрос их поведения в определенных специфических условиях и ситуациях. Температура в Нигерии с каждым сезоном повышается. К свойствам, учитываемым при использовании базальтовых материалов относятся удельный вес, прочность на

растяжение, модуль упругости, деформация при разрыве и температура плавления. Упомянутое повышение температуры стало проблемой, вызывающей озабоченность ученых и инженеров. Эта озабоченность привела к решению в пользу базальтовых материалов в сооружении инженерных коммуникаций и зданий [86]. Это вызывает озабоченность, поскольку строительный материал, используемый в таких местах, высоко устойчив к коррозии и химическим реакциям. С учетом сказанного, базальтовые материалы являются решением проблемы.

В Нигерии можно увидеть большое множество различных типов гражданских и инженерных сооружений. Это мосты, здания (высотные и низкие), дороги, радио/телекоммуникационные вышки, электрические столбы, надземные пожарные резервуары, нефтяные резервуары, котельные и т. д. Большинство этих сооружений построены из стального железобетона, стальных конструкций, местных или примитивных материалов. Эти материалы подвержены ржавчине или разложению с течением времени. Поэтому рекомендуется исследовать возможность внедрения современных конструкционных материалов для обеспечения в Нигерии устойчивого развития строительства [142].

Бетон, армированный стальной арматурой, имеет недостатки в плане прочности и долговечности, в частности, опасность представляет проникновение соленой воды. Когда такая вода достигает стали, она вызывает коррозию и трещины в бетоне. Для эксплуатационной надежности необходимы устойчивость к коррозии, немагнитные и неэлектрические свойства.

Согласно Ch.A. Apostolopoulos и D. Michalopoulos [59], современные методы строительства (СМС) - это нетрадиционные методы, которые включают инновационные, рентабельные, экономически и материалоемкие, более быстрые методы строительства, чем традиционные, внедряемые без ущерба для функциональности, эстетики и качества. СМС - это собирательное понятие, используемое для описания ряда методов, отличающихся от традиционных экономией времени, повышением качества, снижением затрат или сочетанием двух

или всех трех этих факторов, и обеспечивающих тем самым оптимальное соотношение цены и качества. СМС используются в строительстве в первую очередь зданий, дорог, плотин и мостов, поскольку они потенциально предполагают экономию времени и/или затрат и материалов, а также более высокие стандарты качества по сравнению с традиционными методами строительства (ТМС). СМС включают в себя инновационные строительные технологии, инновационные строительные материалы, а также инновационные методы проектного финансирования. Таким образом, мы придаем большее значение устойчивому развитию и техническому обслуживанию. В развитых странах СМС внедряются ради экономии затрат и времени и повышения прочности и эстетичности.

Согласно К. Stanish [141], представляет интерес использование ресурса и непосредственное применение в строительстве морского песка. Это очень актуальная сегодня тема. Как способ избежать проблемы коррозии стали в бетоне с морским песком рассмотрена замена стальной сетки базальтовой для армирования раствора с морским песком тонкой пластиной. Эта новая тонкая пластина привела к структурным характеристикам, явно превосходящим характеристики при применении тонкой пластины из стальной сетки. В работе G. Koch, M. Brongers, N. Thomson, Y. Virmani, J. Payer [102] были исследованы показатели долговечности как для естественных сред помещений, так и для влажных/сухих сред. Результаты экспериментов показали, что после годового воздействия окружающей среды помещения прочность на растяжение тонкой пластины из БФАП-сетки незначительно варьировалась, прочность на изгиб значительно снизилась, а ductility возросла, что незначительно лучше, чем у тонкой пластины из стальной сетки. Однако при воздействии влажных/сухих сред картина изменилась: после года в солевом растворе прочность на растяжение, прочность на изгиб и ductility тонкой пластины БФАП-сетки снизились значительно. Характеристики тонкой пластины из стальной сетки в этих условиях были явно лучше. В связи с сокращением запасов речного песка и развитием

морского строительства все большее внимание привлекает разведка и использование ресурсов морского песка. В настоящее время существует два основных подхода к использованию морского песка: напрямую и после промывки. Из-за высокой стоимости и низкой эффективности последнего подхода, прямое использование будет преобладающим подходом в будущем. Однако хлориды в морском песке вызывает коррозию стали, что является прямым вызовом для использования морского песка в бетоне.

Основные структурные эффекты коррозии стальных и железобетонных конструкций были рассмотрены [137]. Коррозия - это химический процесс, при котором очищенные от примесей металлы, например сталь, возвращаются к своему более низкоэнергетическому, более естественному и стабильному состоянию руды (в данном случае к оксиду железа). Эти явления научно объясняются с помощью закона энтропии. Реакция протекает с потерей стального материала и образованием красной ржавчины, которая обычно в 4 - 7 раз больше по объему [19,60].

Продукты коррозии занимают больше места, чем исходные атомы железа в стали. По мере того как эти продукты коррозии накапливаются, область вокруг арматурной стали пытается расшириться. Из-за относительной слабости бетона при растяжении это расширение вызывает образование трещин в бетоне. В конечном итоге эти трещины могут достичь поверхности, обеспечив тем самым прямой путь из внешней среды к поверхности арматуры [167].

В дополнение к растрескиванию бетона продукты коррозии также снижают прочность связи между сталью и бетоном. Эта прочность соединения необходима для того, чтобы армированный бетон был композитным материалом. Разрушение бетона через растрескивание может в конечном итоге привести к тому, что бетон отпадет от конструкции. Эта более обширная форма растрескивания известна как выкрашивание. Растрескивание и выкрашивание - это признаки деградации, которые можно наблюдать невооруженным глазом. Однако эти предупреждающие знаки указывают на поздние стадии коррозионного повреждения. Как только бетон

начинает выкрашиваться от конструкции, структурная целостность бетонного элемента уже нарушена.

Согласно И. Карпесью [11], коррозия является главным бедствием армированных металлом конструкций и сооружений, стальных конструкций и металлических изделий. Специалисты постоянно находятся в поиске способов замены металла материалами, способными успешно противостоять коррозии, будучи при этом одинаково недорогими, легкими и простыми в производстве. БФ все чаще рассматривается как предпочтительный материал, подходящий для предотвращения коррозии в силу своих свойств.

По сравнению с другими типами фибры функциональность **базальтовой фибры** привлекает постоянный интерес специалистов, которые высоко оценивают ее потенциал для коммерческого применения. Современные технологии значительно снизили стоимость базальтового волокна почти до уровня стекловолокна, а свойства базальтового волокна дают преимущества перед последним.

Базальтовая арматура позволяет возводить прочные и устойчивые к агрессивным средам плавучие фундаменты, пригодные для ветропарков на глубоководных участках. Пример экономически эффективного прочного плавучего фундамента размещен на сайте ветроэнергетики. Поскольку все конструкции находятся в агрессивной морской среде, этот аспект диктует высокие требования к прочности материалов. Традиционно используются стальные конструкции или сталежелезобетон. Однако другие инновационные технологии, такие как геополимерный цемент с базальтовой арматурой (ГЦБА), все чаще находят свое применение в морских сооружениях M.V. Tumadhir [150], C. Wilson [157].

1.3 Вывод по голове 1

Легкий керамзитовый заполнитель - это экологически чистый бетонный крупнозернистый заполнитель, который, как и любой другой бетонный заполнитель, смешивается в определенной доле с бетоном. Добавление

дисперсного рубленого базальтового волокна в бетон улучшает характеристики бетона. Процентное содержание БФ зависит от плотности бетона.

Из обзора литературы следует, что БФ улучшает прочность на сжатие, прочность на растяжение при скалывании, прочность на изгиб, а также улучшает водостойкость бетона.

Базальтовая арматура, используемая для усиления бетона, снижает степень прогиба облегченной базальтофиброармированной керамзитобетонной балки.

2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Процессы получения облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй в ходе лабораторного эксперимента

2.1.1 Материалы и экспериментальные исследования свойств облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

В данной главе представлены материалы, методики и экспериментальные исследования прочности, трещиностойкости и деформируемости свободно опирающихся обычных и предварительно напряженных гнутых и сжатых рубленых базальтовых волокон легкого керамзитобетона с базальтовой арматурой в качестве композиционных арматурных элементов со статическим нагружением. В настоящей главе подробно рассмотрены материалы, необходимые для проведения экспериментов.

Будут исследованы методы конечных элементов трех бетонных конструктивных элементов (цилиндрические колонны, балки и плита) для получения некоторых свойств бетонных элементов посредством конечно-элементного анализа.

Целью экспериментальных исследований является определение влияния базальтовой фибры на керамзитобетон и совместимости рубленого базальтового волокна, базальтовой арматуры и керамзита противостоять трещинам и разрушению в силу потери прочности; воздействию агрессивных сред на бетон и базальтовую композитную арматуру, на прочность сжатых бетонных колонн и изогнутых балок, а также плит с продольной базальтовой арматурой при их статическом нагружении.

Экспериментальные исследования проводились в лаборатории научно-образовательного центра Департамента строительства Инженерной Академии Российского университета дружбы народов (РУДН). Эксперименты были

выполнены при участии В.В. Галишникова, М. Харун, А.С. Марковича и Д.А. Милосердовой.

Порядок проведения испытаний

Основной инженерный метод - эксперимент, относящийся к эмпирическим методам исследования. С точки зрения возможности вмешательства в ход эксперимента различают:

- активный эксперимент и
- пассивный эксперимент.

Все активные методы проведения эксперимента объединены под названием "метода планирования эксперимента". Активный эксперимент наиболее эффективен в лабораторных условиях. Под пассивным экспериментом понимается накопление информации в обычном эксплуатационном режиме, обычно в производственных условиях на существующем оборудовании, что позволяет не тратить время и средства на постановку экспериментов. Но есть несколько существенных недостатков:

- ограниченная вариативность технических средств во избежание брака продукции,
- отсутствие возможности произвольного варьирования этих средств и т.д.

Такой способ получения модели значительно более долгов, чем при активном эксперименте, но зачастую он является единственно возможным и экономически целесообразным. В пассивном эксперименте математико-статистические методы используются только для обработки результатов.

Планирование эксперимента (методика экспериментального проектирования) – это комплекс мероприятий, направленных на эффективную постановку эксперимента. Основной целью планирования эксперимента является достижение максимальной точности измерений при минимальном количестве экспериментов и достоверности полученных результатов. Методы планирования эксперимента позволяют минимизировать количество требуемых испытаний, установить рациональный порядок и условия проведения исследований в

зависимости от их вида и требуемой точности результатов. Если по каким-то причинам количество испытаний заведомо ограничено, то методы планирования позволят определить оценку точности, с которой в этом случае будут получены результаты. Методы допускают случайный характер рассеяния свойств исследуемых объектов и характеристик используемого оборудования. Они основаны на теории вероятностей и математической статистике. Вся терминология и основные методы планирования эксперимента регламентируются ГОСТ 24026-80 [11].

Материалы для испытаний

В настоящей главе рассматриваются материалы для легкого бетона, которые, как ожидается, будут получены в ходе предстоящего эксперимента и анализа.

Изобретение касается состава облегченного керамзитового базальтофибробетона и может найти применение в промышленности строительных материалов. Облегченный керамзитобетон с базальтовой фиброй получают из смеси, содержащей цемент, керамзит фракции 5 мм-8 мм, микрокремнезем со средним размером частиц 0,01-1 мкм, модификатор бетона (МБ10-50С), кварцевый песок фракции 0,8-1,4 мм, кварцевую муку, суперпластифицирующая добавка Sika SikaPlast Concrete (Сика Сикапласт), воду и базальтовое волокно.

Все бетонные смеси обладают своими индивидуальными свойствами. Эти свойства приводятся по каждому из материалов.

Вода. Будет использоваться водопроводная вода без каких-либо добавок для водоредуцирования при комнатной температуре. Тип воды соответствует ГОСТам 23732-2011 [10].

Керамзит. Керамзит – природный и экологически чистый изоляционный материал с фракцией от 5 мм до 8 мм (Рисунок 2.1), который будет использоваться в качестве заполнителя для бетонной смеси. Материал получают путем обжига специальных сортов глины в высокотемпературных печах. Этот керамзит известен как легкий заполнитель. Керамзит экологически безопасен, не разлагается,

устойчив к воздействию влаги и открытого пламени, обладает хорошей тепло – и звукоизоляцией. Этот пористый материал является одним из наиболее эффективных для теплоизоляции, пользуется большим спросом в производстве строительных материалов (керамзитобетон, легкий бетон и др.) и в утеплении жилых зданий (утепление столбчатого фундамента, перекрытий на первом этаже дома и др.). Основными свойствами являются фракция зерна, насыпная плотность и прочность.



Рисунок 2.1 - Керамзитовый
заполнитель



Рисунок 2.2 - Кварцевый песок

Свойства керамзитового заполнителя были рассмотрены в разделе 1.2.2 настоящей диссертации.

Кварцевый песок. Кварц – это наиболее распространенные в природе минерал. Кварцевый песок представляет собой смесь, полученную дроблением кварца (Рисунок 2.2). Размер зерна колеблется от 0,05 мм до 3 мм [41].

Кварцевый песок имеет следующие характеристики:

- Отличительной чертой кварцевого песка является его мономинеральность. Эта особенность определяет ценность материала как промышленного сырья.

- Кварцевый песок обладает межзерновой пористостью. Если сравнивать кварцевый песок с другими материалами, то можно сказать, что он обеспечивает оптимальную грязеудерживающую способность.

Кварцевый песок имеет следующие основные свойства:

- Химический показатели

Кварцевый песок имеет особую кристаллическую структуру, которая определяет его прочность и устойчивость к воздействию кислот и щелочей. Оптимальный химический состав и высокая твердость кварцевого песка

обеспечивают его огнеупорность. Кварцевый песок относится к диэлектрикам, проявляет инертность к большинству химических элементов.

- Физические показатели

Кварцевый песок обладает:

- дробимость - 0,3.
- истирание - 0,1.
- 1 класс по радиоактивности.
- твердость - 7 (по шкале Мооса).
- высокая морозостойкость.
- насыпная плотность (удельный вес кварцевого песка) составляет 1300-1500 кг/м³.

Строительный песок для настоящего эксперимента соответствует ГОСТ 8736-2014 [13]. модуль крупности кварцевого песка < 2 мм (средняя крупность), то есть 0,8 мм – 1,4 мм.

Цемент. Цемент Holcim ExtraCEM серый (Рисунок 2.3) - это портландцемент производства ООО "Спецторг", Россия. Цемент марки М500 - надежный материал, который используется для изготовления высококачественного, прочного бетона, сборных бетонных конструкций, гидротехнических сооружений и др. Он достаточно быстро твердеет, но при этом долго сохраняет свою прочность не только на воздухе, но и в воде.



Рисунок 2.3 - Цемент Holcim ExtraCEM серый М500



Рисунок 2.4 - Кварцевая мука SilverBond 50

Используя цемент этой марки, необходимо учитывать тот факт, что в процессе высыхания он может быть подвержен усадке. Некоторые из характеристик цемента таковы:

- Цвет этой смеси - серый.
- Цемент этой марки выдерживает нагрузку не менее 500 кг/см².
- Вес одного мешка - 50 кг.

Кварцевая мука SilverBond 50. Кварцевая мука SilverBond - это мелкоизмельченный кварцевый наполнитель, получаемый из кварцевого песка путем измельчения его в шаровой мельнице, а затем классифицируется на сорта различной дисперсности (Рисунок 2.4).

Свойства кварцевой муки SilverBond:

- твердость и стойкость к истиранию.
- высокая химическая стойкость.
- коррозионная стойкость.
- низкая маслосъемность.
- низкий коэффициент теплового расширения.
- способность сужать поры в бетоне.
- высокая прочность на сжатие и растяжение.
- увеличение адгезии.
- низкий расход воды.
- устойчивость к усадке.
- повышение морозостойкости.
- повышение водостойкости.

Кварцевая мука SilverBond позволяет достичь высоких физико - механических, а также превосходных реологических свойств. Цифра 50 в названии означает, что размер частиц кварцевой муки составляет 50 мкм. Наполнители SilverBond, содержащиеся в специальных бетонах, улучшают физико-механические свойства этих составов без увеличения вяжущего. При создании специальных бетонных составов для специальных конструкций (высотных зданий, гидроэлектростанций, объектов атомной энергетики) предлагается использовать высококачественное и стабильное по своему составу сырье [20]. Кварцевая мука

(Рисунок 2.4) для настоящего эксперимента была изготовлена Раменским ГОКом, Россия.

Суперпластификатор Sika Sikaplast Concrete коричневый. SikaPlast Concrete (Рисунок 2.5) - суперпластификатор производства компании Sika. Это суперводоредуцирующая добавка, предназначенная для производства высококачественных бетонных смесей и получения бетона с высокими эксплуатационными характеристиками. Sikaplast применяется при изготовлении бетона для возведения фундаментов, колонн, стен и перекрытий в жилых и общественных зданиях. Высокая тиксотропность Sikaplast Concrete позволяет ускорить укладку бетонной смеси и снизить затраты на виброуплотнение при изготовлении высококачественных монолитных армированных бетонных конструкций [43]. Следующие свойства обладает Суперпластификатор Sika Sikaplast Concrete коричневый.

- Мощный пластифицирующий эффект.
- Устойчивая подвижности бетонной смеси.
- Сильное снижение воды (до 30%).
- Возможность изготовления высокоподвижных смесей.
- Повышение прочности, водостойкости и морозостойкости бетона или снижение расхода цемента.
- Увеличение срока службы бетона.
- Меньшая усадка.



Рисунок 2.5 - Суперпластификатор Sika Sikaplast Concrete коричневый



Рисунок 2.6 - Модификатор бетона МБ 10-50С

Модификатор бетона МБ 10-50С. Модификатор бетона МБ 10-50С (рисунок 2.6) многофункционального действия предназначен для использования в качестве комплексной добавки в растворы и бетоны. Производится "Предприятием Мастер Бетон". Модификаторы серии "МБ" изготавливаются для производства бетона с высокими эксплуатационными свойствами из высокоподвижных смесей на обычном портландцементе с повышенной ранней прочностью, в том числе на изгиб, низкой проницаемостью и сверхвысокой прочностью, достигаемой только за счет комбинированного использования дисперсных минеральных компонентов и суперпластификаторов. Модификаторы транспортабельны и технологичны, что не приводит к увеличению затрат, связанных с производством бетона. Поскольку модификаторы представляют собой композиционные материалы полифункционального действия, их использование улучшает технологические свойства бетонных смесей [28].

МБ10-50С имеет следующие характеристики/ свойства:

- При строительстве монолитных армированных бетонных массивов, обеспечивающих низкую кинетику тепловыделения и высокую стойкости к термическим трещинам.
- При создании конструкций из бетонов с низкой проницаемостью (марки гидроизоляции W12 ... W20) с повышенной коррозионной и морозостойкостью и обеспечением высокой прочности.
- При создании конструкций из тяжелых, легких и мелкозернистых высокопрочных (классы В40 ... В60) и сверхвысокопрочных (классы В70 ... В100) пластичных и самовыравнивающихся бетонных смесей.
- При необходимости обеспечения высокой ранней прочности, достаточной для сноса конструкций и их нагрузки.
- При возведении специальных конструкций используются высокопластичные, самовыравнивающиеся и нерасслаивающиеся бетонные смеси.

- Для высокоплотных и прочных защитных обмазок методом пневмобетонирования ("мокрого" торкретирования) и при ремонтно-восстановительных работах на важных конструкциях.

- При строительстве уникальных сооружений и сооружений из высокопрочного и сверхвысокопрочного дисперсно-армированного бетона (фибробетона).

- При строительстве бетонных конструкций с особо низкой проницаемостью для консервации и захоронения отходов, в том числе радиоактивных.

- Малогабаритные изделия для малоэтажного и коттеджного строительства.

Условное обозначение модификатора бетона: "МБ 10-50С": первый цифровой индекс в обозначении указывает на содержание пластификатора в массе модификатора (%), второй - на содержание золы-уноса в массе минеральной части модификатора (%).

Микрокремнезем МК-85, или микронаполнитель. Микрокремнезем МК-85, или микронаполнитель (Рисунок 2.7), является побочным продуктом металлургического производства при выплавке ферросилиция и его сплавов, образующийся в результате восстановления углеродом кварца высокой чистоты в электропечах.

Новые возможности применения микрокремния МК-85 тесно связаны с прогрессом в создании эффективных суперпластификаторов - их сочетание дало толчок к созданию бетона нового поколения с высокой прочностью (от 60 до 150 МПа), повышенной удобоукладываемостью и долговечностью.

Микрокремнезем МК-85 представляет собой очень мелкие шарообразные частички аморфного кремнезема со средней удельной поверхностью около $20\text{ м}^2/\text{г}$. Микрокремнезем используется в качестве высокоактивной минеральной добавки к бетону и цементу и предназначен для приготовления бетона высокого класса прочности и водостойкости, а также высокой коррозионной стойкости.

Допустимой областью применения бетона с микрокремнеземом (при его дозировках в пределах 20% от массы цемента) являются все бетонные и железобетонные конструкции гражданских и промышленных зданий, в том числе системы питьевого водоснабжения.

Применение микрокремнезема в бетонах:

- подвергающихся эрозионному истиранию (с добавлением 18% МК-85, прочность которого на сжатие в 28-дневном возрасте составляла примерно 90 МПа).
- коррозионностойких (бетонные смеси содержат около 385 кг/м³ цемента и 7,5-10% кварцевого порошка при соотношении вода/цемент = 0,40).
- обладающих высокой прочностью в раннем возрасте (строительство мостов, туннелей, автодорог, взлетно-посадочных полос и т.п.).
- высокопрочных - до 140 МПа (355-565 кг/м³ цемента, 5-15% кварцевого порошка, вода/цемент = 0,24).
- с реакционно-способными заполнителями (до 20% МК-85).
- стойких к истиранию (полы промышленных зданий, автомобильные стоянки, тротуары и дорожные покрытия).
- обладающих повышенной долговечностью и водонепроницаемостью (для применения в агрессивных средах, связанных с воздействием хлоридов, сульфатов и солей-антиобледенителей).
- для строительства морских и береговых сооружений.

Микрокремнезем МК-85 для неастоящего эксперимента изготовлен Новолипецким Metallургическим Комбинатом [27].



Рисунок 2.7 - Модификатор микрокремнезем МК 85

Рубленое базальтовое волокно. Рубленые базальтовые волокна, как известно, производятся из базальтовых пород, которые плавятся при температуре 1400°. Базальтовое волокно (Рисунок 2.8) в силу своих природных свойств признано экологически безопасным, нетоксичным, обладающим высокой стабильностью и высокими изоляционными характеристиками материалом. Свойства и характеристики рубленого базальтового волокна рассматриваются в разделе 1.2 главы 1 настоящей диссертации. Рубленое базальтовое волокно "БС 16-24-76", используемое в настоящей диссертации, изготовлено ООО "ТД "Русский Базальт".



Рисунок 2.8 - Рубленое базальтовое волокно



Рисунок 2.9 - Базальтовая арматура

Базальтовые арматуры. Базальто-фибро-армированные полимеры (БФАП), как и другая полимерная арматура (Рисунок 2.9), производятся с учетом того, что они работают в основном на растяжение. Свойства БФАП описаны в разделе 1.2 главы 1 настоящей диссертации. Базальтовая арматура АБК 10м-1а ТУ 23.99-004-47390793-2017 (Рисунок 2.9), рассматриваемая в настоящей диссертации, изготовлена ООО "ТД "Русский Базальт".

Базальтовая сетка. Для изготовления сетки (Рисунок 2.10) используется базальтовое волокно предусмотренного для соответствующих полимерных композиций качества. На рисунке 2.10 - базальтовая сетка Экострой-СБС 25x25 мм.

Технические характеристики строительной сетки Экострой можно распределить на следующие:

- Прочность при растяжении: продольное направление - 50 кН/м, поперечное - 50 кН/м.

- Относительное удлинение (продольное, поперечное направление) составляет около 4%.
- Поверхностная плотность - 200 г/м².
- Характеристики рулона: ширина - 36см, длина-50м.
- Размер ячейки: 25х25 мм.

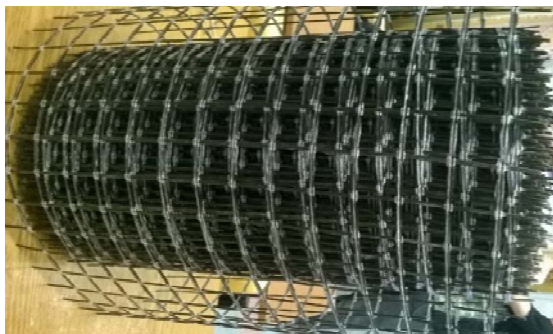


Рисунок 2.10 - Базальтовая сетка (БФАП)

Программа экспериментального исследования

Согласно плану исследования, для приготовления облегченного керамзитобетона использовались следующие материалы:

- Керамзит фракцией 5-8 мм = 200 кг/м³ в качестве крупнозернистого заполнителя.
- Кварцевый песок фракции 0,8-1,4 мм с модулем крупности 2,7 = 585 кг/м³ в качестве мелкого заполнителя.
- Кварцевая мука 50 мкм = 100 кг/м³ в качестве минерального наполнителя.
- Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н = 500 кг/м³ в качестве вяжущего.
- Микрокремнезем = 62,5 кг/м³ и МБ 10-50С = 62,5 кг/м³ в качестве добавок на органо-минеральной основе.
- SikaPlast Concrete = 8 л/м³ в качестве суперпластифицирующей и водопонижающей добавки.
- Водопроводная вода = 255 л/м³ для смешения.

Для волокнистых добавок и армирования:

- Рубленое базальтовое волокно длиной 20 мм и диаметром 15 мкм.

- Арматура из базальтового волокна диаметром 10 мм.
- Базальтовая сетка с ячейками 25 мм x 25 мм. Стальная арматура $\varnothing 10\text{mm}$

2.1.2 Характеристики рубленого базальтового волокна, способствующие улучшению облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

В этом подразделе диссертации основное внимание уделяется определению оптимального процентного содержания рубленого базальтового волокна, которое дало бы максимальную прочность по сравнению с другими рассматриваемыми процентными соотношениями. Пропорции/проценты рубленого базальтового волокна (фибры), которые будут рассмотрены: 0,45% БФ, 0,9% БФ, 1,2% БФ и 1,6% БФ. Для получения этих процентных соотношений использовалось уравнение (2.1). Средняя плотность используемого облегченного керамзитобетона составляет 1500 кг/м^3 .

$$\frac{\% \text{БФ}}{100} \times \text{Плотность бетона}, \quad (2.1)$$

Экспериментальные исследования будут проводиться в соответствии с Межгосударственным стандартом СНГ ГОСТ 10180-2012 [9]. Машина для проведения испытаний представляет собой универсальную испытательную машину Matest (Рисунок 2.11 а и б) в лаборатории Инженерной академии Российского университета дружбы народов (РУДН).

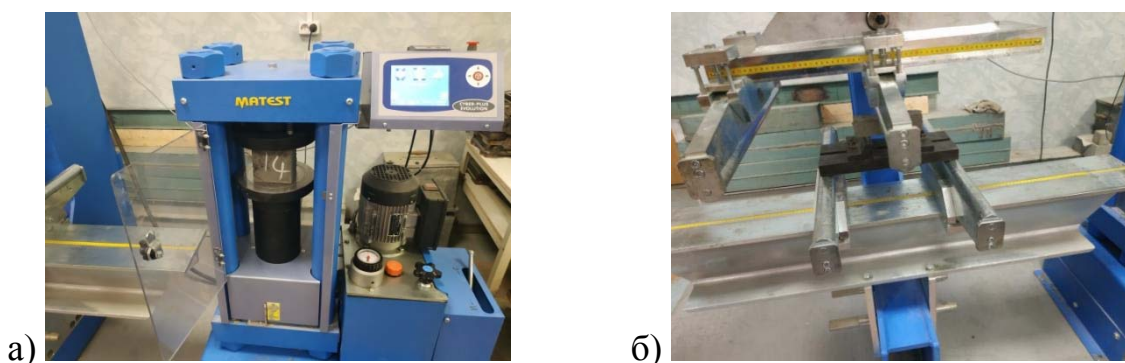


Рисунок 2.11 - Испытание на универсальной испытательной машине Matest: а) Испытание на сжатие на универсальной испытательной машине Matest; б) Испытание на изгиб на универсальной испытательной машине Matest.

Кубы и призмы, которые будут использоваться при выборе наилучшего процента БФ для керамзитобетона, после залива керамзитобетонной смеси в формы накрываются влажной тканью и полиэтиленовой пленкой и хранятся в сухой среде при температуре 20 ± 5 градусов (Рисунок 2.13 а и в соответственно).

Бетонные кубы и призмы извлекаются из форм на 48-й час, а затем помещаются в цифровую камеру для выдерживания бетонных образцов (Рисунок 2.13е). Эта камера должен работать при температуре 20 ± 2 °C и относительной влажности воздуха $(95 \pm 5)\%$ и обеспечивать кубам и призмам должное увлажнение. Уровень воды в сосуде для выдерживания образцов постоянно контролировался и восполнялся каждые 24 часа.

Испытания на сжатие образцов кубов облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

В ходе эксперимента будет подготовлено всего 5 бетонных смесей. Из каждой из этих смесей было изготовлено 27 кубических образцов размером 100 мм x 100 мм x 100 мм. Эти 27 кубических образцов будут распределены на 3 разных дня испытаний (день 7, день 14 и день 28), что составит в общей сложности 135 кубических образцов для испытания на сжатие. Ниже перечислены 5 бетонных смесей:

- Смесь 1: контрольные кубические образцы облегченного керамзитобетона, 0% БФ.
- Смесь 2: кубические образцы облегченного керамзитобетона с 0,45% БФ.
- Смесь 3: кубические образцы облегченного керамзитобетона с 0,9% БФ.
- Смесь 4: кубические образцы облегченного керамзитобетона с 1,2% БФ.
- Смесь 5: кубические образцы облегченного керамзитобетона с 1,6% БФ.

Кубические образцы изготовлены в 3 кубических опалубках размером 100 мм x 100 мм x 100 мм каждая (Рисунок 2.13б). Анализ результатов экспериментов приведен в главе 3 настоящей диссертации. Уже подготовленные кубы показаны на рисунке 2.13г. По результатам испытаний 9 образцов бетонных кубов каждой бетонной смеси на каждый день выводится средняя прочность. Экспериментальное исследование керамзитобетона при испытании на сжатие, до 1500 кН, проводилось в периоды отверждения на гидравлическом прессе (Рисунок 2.11а). Математическая обработка экспериментальных данных проводилась на основе теории вероятностей и математической статистики, что позволило получить результаты экспериментального исследования с достоверностью $\alpha \approx 0,95$.

Использование указанных материалов для изготовления образцов керамзитобетона и их изучение вышеуказанным методом позволило получить статистически значимые результаты экспериментальных исследований.

Испытания на изгиб формированных в виде призмы образцов облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

Для проведения эксперимента по испытанию на изгиб будет подготовлено всего 5 бетонных смесей. Из каждой из этих смесей было изготовлено 27 образцов прямоугольных призм размером 40 мм x 40 мм x 160 мм. Эти 27 кубических образцов будут распределены на 3 разных дня испытаний (день 7, день 14 и день 28), что составит в общей сложности 135 кубических образцов для испытания на изгиб. Ниже перечислены 5 бетонных смесей:

- Смесь 1: контрольные образцы прямоугольных призм облегченного керамзитобетона, 0% БФ/
- Смесь 2: образцы прямоугольных призм облегченного керамзитобетона с 0,45% БФ.
- Смесь 3: образцы прямоугольных призм облегченного керамзитобетона с 0,9% БФ.
- Смесь 4: образцы прямоугольных призм облегченного керамзитобетона с 1,2% БФ.

- Смесь 5: образцы прямоугольных призм облегченного керамзитобетона с 1,6% БФ.



а)

б)

Рисунок 2.12 – Опалубки: а) куб; б) прямоугольная призма.

Образцы прямоугольных призм изготовлены в 3 опалубках размером 40 мм х 40 мм х 160 мм каждая (Рисунок 2.12б). Анализ результатов экспериментов приведен в главе 4 настоящей диссертации. Уже подготовленные призмы показаны на рисунке 2.13д. По результатам испытаний 9 образцов бетонных призм каждой бетонной смеси на каждый день выводится средняя прочность. Такой размер призм используется в экономических целях. Чтобы установить наилучшее процентное содержание рубленого базальтового волокна для этого облегченного керамзитобетона, подтверждение этого процента будет проведено на образцах размером 100 мм х 100 мм х 400 мм с меньшими образцами.

Чтобы установить наилучшую долю рубленого базальтового волокна в этих бетонных призмах размером 100 мм х 100 мм х 400 мм, будут подготовлены 5 бетонных смесей. Из каждой из этих смесей было изготовлено 9 образцов прямоугольных призм. Эти 9 образцов призм будут распределены на 3 разных дня испытаний (день 7, день 14 и день 28), что составит в общей сложности 45 образцов призм для испытания на изгиб. 5 бетонных смесей те же, что и в призмах 40 мм х 40 мм х 160 мм. Экспериментальное исследование керамзитобетона при испытании на изгиб, до 150 кН, проводилось на гидравлическом прессе (рисунок 2.11б).

Анализ результатов экспериментов приведен в главе 3, настоящей диссертации. Уже подготовленные призмы показаны на рисунке 2.13д. По результатам испытаний 9 образцов бетонных призм каждой бетонной смеси на каждый день выводится средняя прочность.

После испытания на прочность на сжатие и на изгиб выбирается подходящий процент рубленого базальтового волокна, который будет использоваться во всех последующих бетонных смесях в настоящей диссертации. На рисунке 2.13 показаны смеси и образцы облегченного керамзитобетона с БФ.

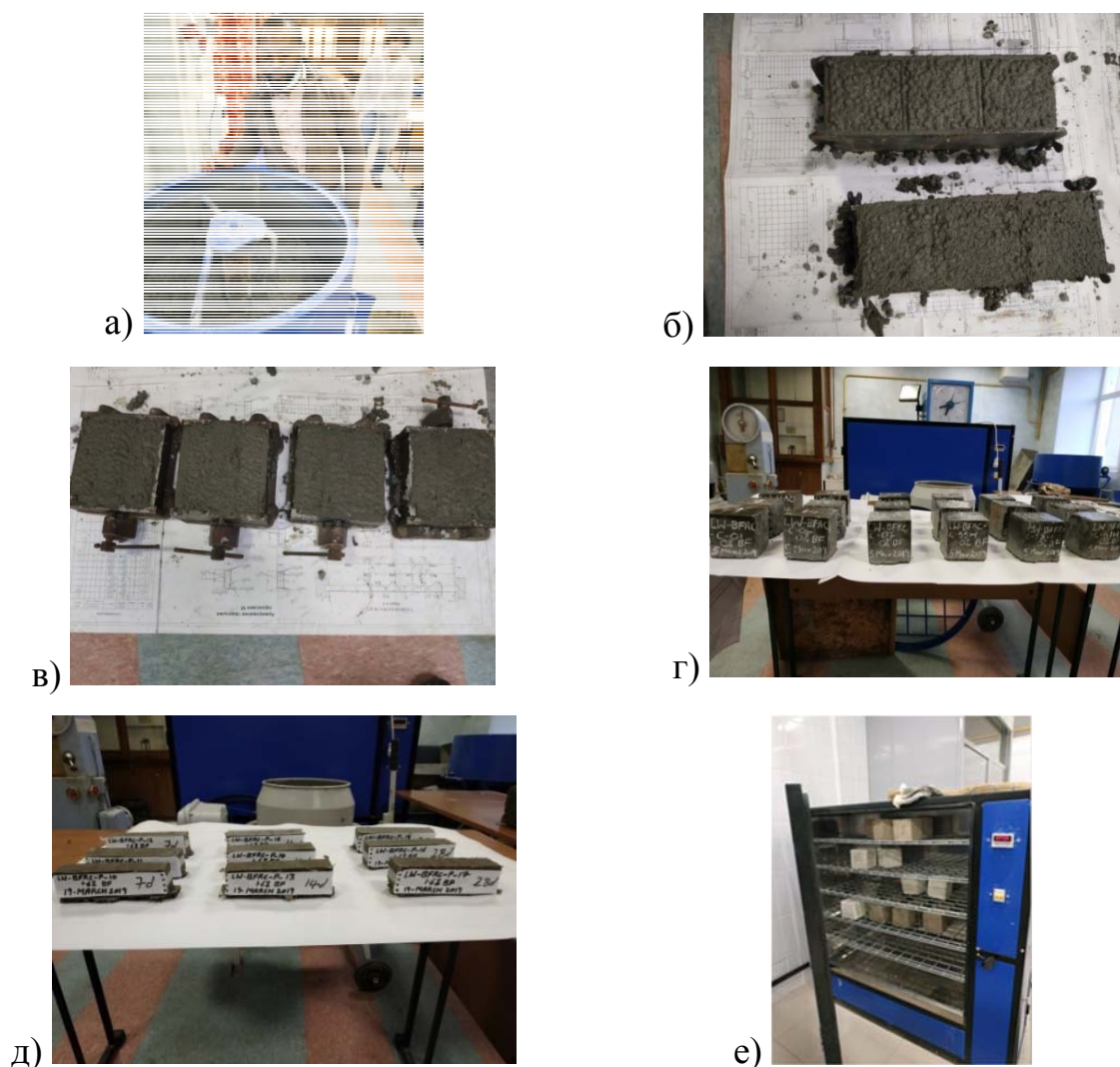


Рисунок 2.13 - Бетонные опытные смеси и образцы: а) Приготовление бетонной смеси; б) Формирование бетонного куба; в) Формирование бетонной призмы; г) Образцы бетонных кубов; д) Образцы бетонной призмы; е) Цифровая камера для выдерживания бетонных образцов.

Испытание армированного базальтовой фиброй керамзитобетона на растяжение со скалыванием

Будет фиксироваться максимальная нагрузка, приложенная к образцам. Среднее из трех значений берется как общий показатель. Всего было изготовлено

5 серий испытательных образцов керамзитобетона из заявленных составов с размерами 100x100x100 мм. В соответствии с планом эксперимента каждая серия состоит из 9 образцов, всего 45 образцов. Все образцы керамзитобетона были выдержаны в цифровой камере для выдерживания бетонных образцов при температуре 19-22 °С, как показано на рисунке.

Экспериментальное исследование керамзитобетона при испытании на сжатие проводилось с периодами выдерживания 7, 14 и 28 дней на гидравлическом прессе, с силой до 1500 кН (см. рисунок 2.14). Математическая обработка экспериментальных данных проводилась на основе теории вероятностей и математической статистики.

Математическая обработка экспериментальных данных проводилась на основе теории вероятностей и математической статистики. Использование указанных выше материалов для изготовления образцов керамзитобетона и их изучение вышеуказанным методом позволило получить статистически значимые результаты экспериментальных исследований.

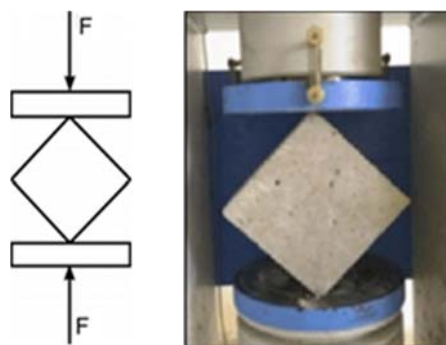


Рисунок 2.14 Загрузка образца куба керамзитобетона в испытательную машину

2.1.3 Пределы прочности конструктивных элементов из армированного базальтоволокнистым полимером облегченного керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй

Этот раздел касается прочности на изгиб и сжатие 3 (трех) типов бетонных конструктивных элементов. Эти элементы усилены БФАП и стальной арматурой.

Керамзитобетонная смесь с содержанием 1,6% дисперсного рубленого базальтового волокна. 1,6% дисперсного рубленого базальтового волокна.

Цилиндрические керамзитобетонные колонны

Эти колонны изготовлены из тех же бетонных смесей, что использовались в настоящей диссертации для экспериментального анализа. Колонны формируются в евро-форме для цилиндрических колонн диаметром $\varnothing 150$ мм x 300 мм высотой (рисунок 2.15).



Рисунок 2.15 - Евро-форма для цилиндрических колонн

Этот структурный элемент будет реализован в 3 (трех) вариантах. Ниже описание этих 3 вариантов:

1) Колонны из облегченного керамзитобетона без дисперсного базальтового волокна и базальто-фибро-армированного полимера (сетки).

В общей сложности 6 (шесть) цилиндрических колонн из облегченного керамзитобетона будут отлиты и испытаны на 28-й день. Среднее значение будет взято для сравнения и анализа. Отлитый цилиндр этого типа показан на рисунке 2.16а.

2) Колонны из облегченного керамзитобетона с дисперсным базальтовым волокном, но без базальто-фибро-армированного полимера (сетки).

В общей сложности 6 (шесть) цилиндрических колонн из облегченного керамзитобетона с дисперсным базальтовым волокном будут отлиты и испытаны на 28-й день. Среднее значение будет взято для сравнения и анализа. Отлитый цилиндр этого типа показан на рисунке 2.16б.

3) Колонны из облегченного керамзитобетона с дисперсным базальтовым волокном и базальто-фибровым полимером (сеткой).

В общей сложности 6 (шесть) цилиндрических колонн из облегченного керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй и базальто-фибровым полимером (сеткой) будут отлиты и испытаны на 28-й день. Схема размещения в цилиндре показана на рисунке 2.17. Среднее значение на каждый день испытаний будет взято для сравнения и анализа. Отлитый цилиндр этого типа показан на рисунке 2.16в.



Рисунок 2.16 - Облегченный керамзитобетон: а) Цилиндрическая колонна из керамзитобетона; б) Цилиндрическая колонна из керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй; в) Цилиндрическая колонна из керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй, усиленная базальтофибровой полимерной сеткой.



Рисунок 2.17 - Базальтофибровая полимерная сетка для внешнего усиления колонны из керамзитобетона с БФ

Прочность на сжатие колонн будет проверена на 28-й день. После испытания будет проведено всестороннее сравнение прочности 3 вариантов бетона. Результаты анализа деформации в следствие напряжения трех вариантов будут отображены графически для их сопоставления. Испытание на сжатие на

гидравлическом прессе ПГ-100 (рисунок 2.20). Результаты этого подраздела проиллюстрированы в Главе 3.

Три тензометрических датчика расположены на корпусе цилиндрической керамзитобетонной колонны и пронумерованы цифрами 1, 2, 3, как показано на рисунке 2.18. Тензометрические датчики 1 и 2 предназначены для измерения деформации в следствие напряжения вертикальной зоны колонны, а тензометрический датчик 3 - для измерения горизонтальной деформации колонны.



Рисунок 2.18 - Расположение тензометрических датчиков на цилиндрической керамзитобетонной колонне

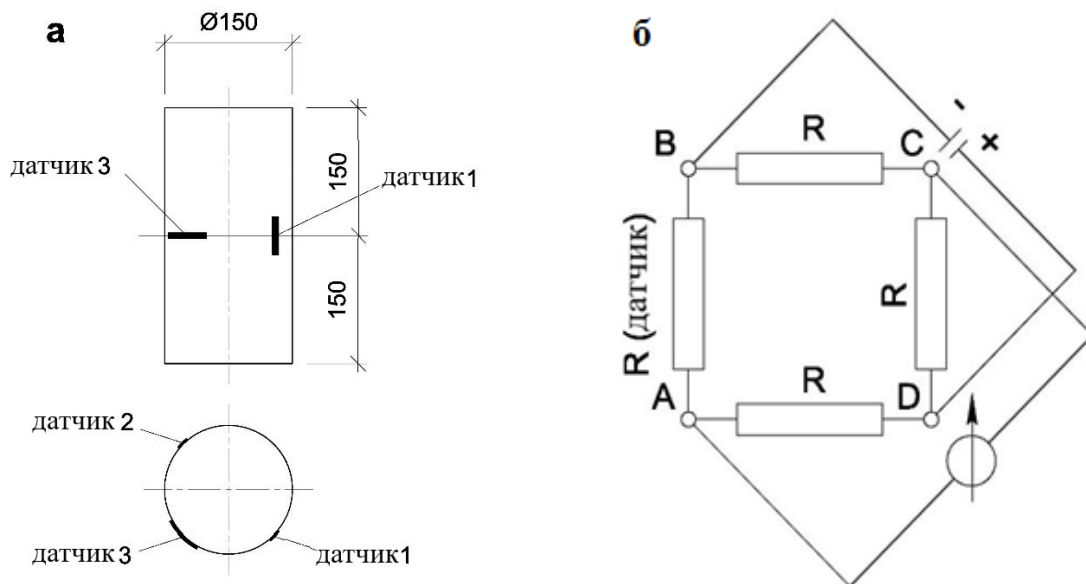


Рисунок 2.19 - Испытание цилиндрической колонны из керамзитобетона: а) тензометрические датчики на цилиндрических керамзитобетонных колоннах; б) схема подключения тензометрических датчиков.

Для регистрации деформаций тензодатчики были подключены к тензометрической станции Zetlab по схеме "полный мост" (рисунок 2.19б). Тензометрические датчики имеют сопротивление 200 Ом.



Рисунок 2.20 - Испытание на сжатие на гидравлическом прессе ПГ-100

Керамзитобетонная балка

Испытание на изгиб/прогиб проводится на 24 балках. Эти 24 балки армированы по четырем разным схемам, описанным ниже в текущем подразделе. Размеры керамзитобетонных балок проиллюстрированы на рисунке 2.21. Образцы керамзитобетонных балок показаны на рисунке 2.22.

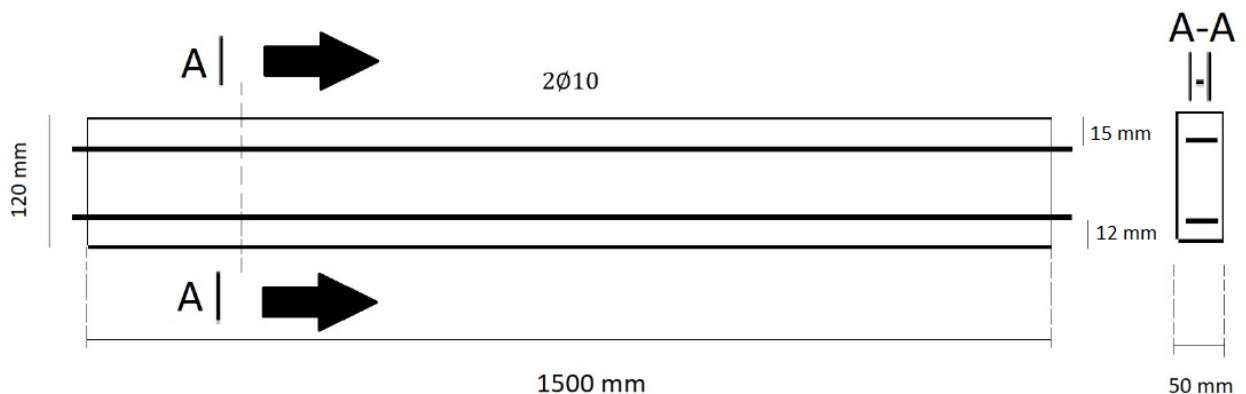


Рис. 2.21. Экспериментальный образец балки



Рисунок 2.22 - Подготовка балки из облегченного керамзитобетона

Бетонная смесь приготовлена в электросмесителе (рисунок 2.13а) и залита в металлическую форму для балок (см. рисунок 2.22). Поэтапные действия в соответствии с Межгосударственным стандартом СНГ ГОСТ 10180-2012 [9]. Размер бетонных балок - 1500 мм в длину x 50 мм в ширину x 120 мм в толщину (см. рисунок 2.21).

Были приготовлены четыре (4) керамзитобетонной смеси. Из каждой смеси было отлито по 6 керамзитобетонных балок. Отлитые в формы керамзитобетонные балки (рисунок 2.22) были покрыты полиэтиленом и выдерживались при комнатной температуре (20 ± 5) °C и относительной влажности воздуха (95 ± 5) %. Балки были изъяты из металлических форм по истечении 74 и 76 часов после заливки и затем помещены в ванну для выдерживания при комнатной температуре. На 28-й день после заливки балки были испытаны на прогибы и трещины.

В рамках проведения четырехточечного испытания на изгиб наверху балки для определения зоны сжатия выбираются две симметричные точки нагружения (рисунки 2.23 и 2.25). Для определения прогиба используется электронная измеритель прогиба. Измеритель прогиба размещается под балкой под углом 45° . Измеренное отклонение принимается с поправкой умножением на $\sin 45^\circ$.

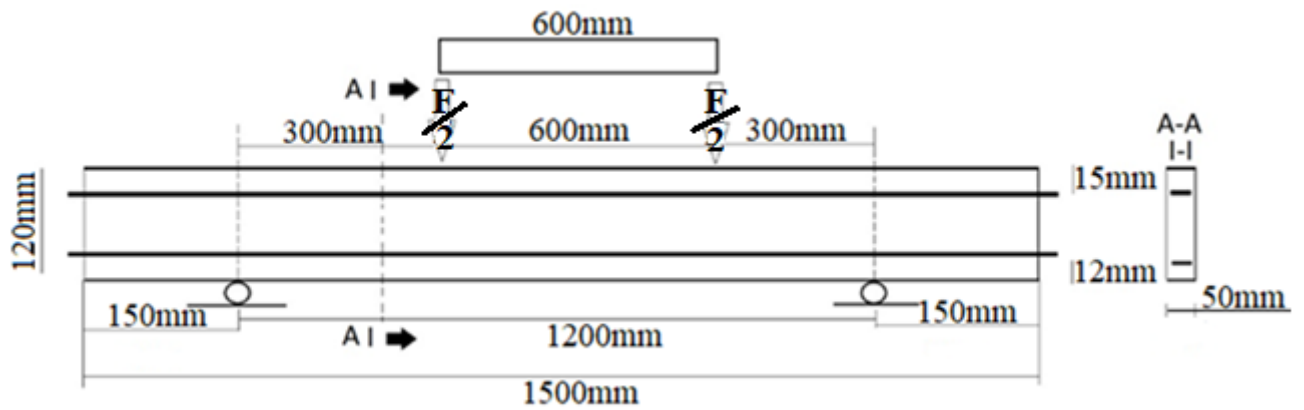


Рисунок 2.23 - Экспериментальный образец балки при четырехточечной нагрузке

Керамзитобетонные балки и их армирование будут реализованы в 4 (четырёх) типах. Ниже описание этих 4 балка типы:

- Балка типа 1: 6 балок из облегченного керамзитобетона, усиленные двумя базальтовыми арматурами $2\phi 10\text{mm}$.
- Балка типа 2: 6 балок из облегченного керамзитобетона, усиленных двумя базальтовыми арматурами $2\phi 10\text{mm}$ дисперсной БФ, длиной 20 мм, диаметром 15 мкм.
- Балка типа 3: 6 балок из облегченного керамзитобетона, усиленных одной базальтовой арматурой $1\phi 10\text{mm}$ и одной стальной арматурой $1\phi 10\text{mm}$ в области балки, работающей на растяжение, и дисперсной БФ.
- Балка типа 4: 6 балок из облегченного керамзитобетона, усиленных двумя базальтовыми арматурами $2\phi 10\text{mm}$, дисперсной БФ, длиной 20 мм, диаметром 15 мкм, и базальтофибровым полимером (сеткой) с размером ячеек 25 x 25 мм.

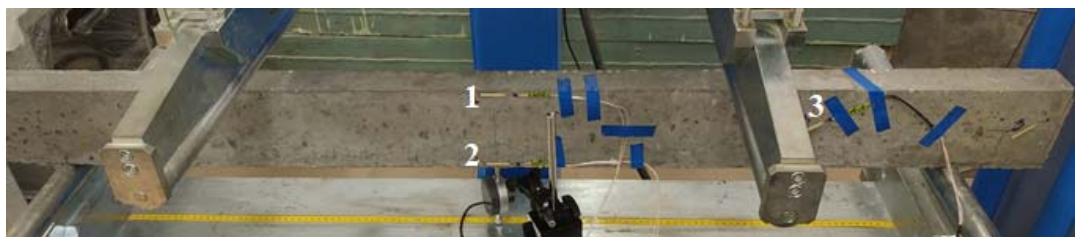


Рис. 2.24. Расположение датчика натяжения на керамзитобетонной балке

Три тензометрических датчика расположены на корпусе керамзитной балки и пронумерованы цифрами 1, 2, 3, как показано на рисунке 2.24 и рисунке 2.25а. Тензометрические датчики 1 и 2 расположены параллельно друг другу. Они служат для измерения трещин и деформаций в зоне сдвига и изгиба балки и располагаются параллельно ей, в то время как тензометрический датчик 3 предназначен для измерений в зоне деформационного изгиба.

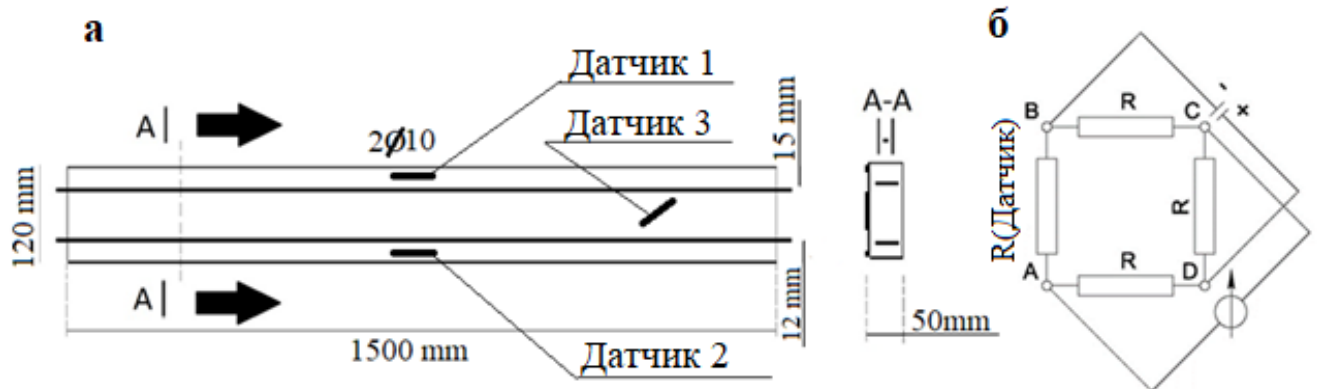


Рисунок 2.25 - Испытание керамзитобетонных балок: а) тензометрические датчики на керамзитобетонной балке; б) схема подключения тензометрических датчиков.

Для регистрации деформаций тензодатчики были подключены к тензометрической станции Zetlab по схеме "полный мост" (рисунок 2.25б). Сопротивление тензометрических датчиков 200 Ом.

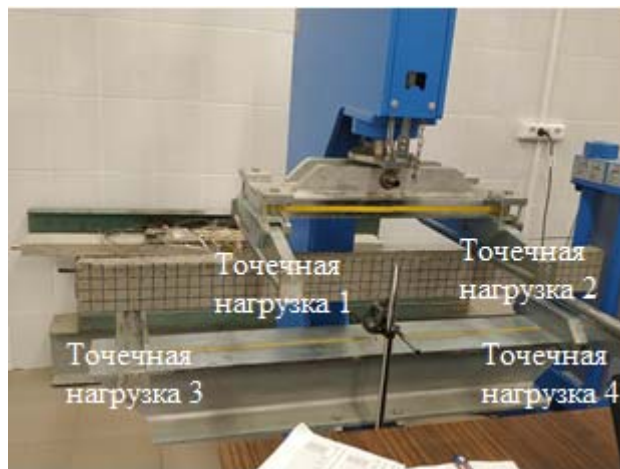


Рисунок 2.26 - Четырехточечная нагрузка на гидравлическом прессе MATEST

Керамзитобетонные балки испытываются на прогиб, деформацию и трещины при четырехточечной нагрузке на универсальной испытательной машине Matest (см. рисунок 2.26).

Керамзитобетонные плиты перекрытия

Испытание на изгиб/прогиб проводилось на 12 керамзитобетонных плитах. Эти 12 плит были армированы четырьмя различными способами, описанными ниже. Размеры керамзитобетонных плит: длина 1500 мм x ширина 500 мм x толщина 65 мм (рисунок 2.27).

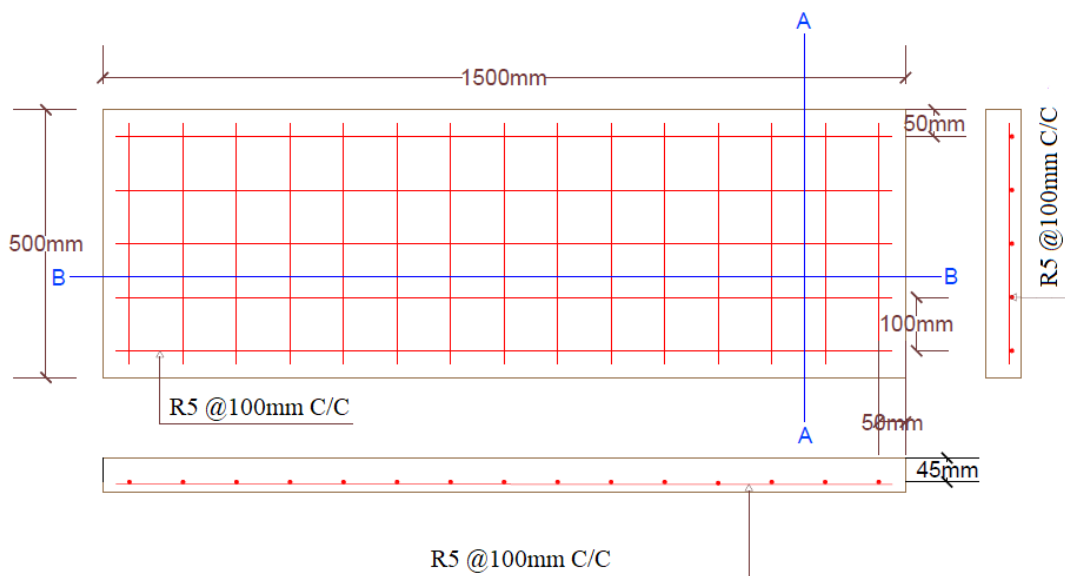


Рисунок 2.27 - Макет керамзитобетонной плиты перекрытия с базальтовой арматурой



Рисунок 2.28 - Положение плиты в пресс-форме для армирования

Положение плиты в пресс-форме для армирования показано на рис. 2.28. Каждая из плит усилена базальтовой арматурой.

Бетонная смесь приготовлена в электросмесителе (рисунок 2.13а) и залита в деревянную форму для плит. Поэтапные действия в соответствии с Межгосударственным стандартом СНГ ГОСТ 10180-2012 [9].

Были приготовлены четыре (4) керамзитобетонной смеси. Из каждой смеси было отлито по 3 керамзитобетонных плиты. Керамзитобетонные плиты были покрыты полиэтиленом и выдерживались при комнатной температуре (20 ± 5) °C и относительной влажности воздуха (95 ± 5) %. Плиты были изъяты из деревянных форм по истечении 74 и 76 часов после заливки и затем помещены в ванну для выдерживания при комнатной температуре. На 28-й день после заливки плиты были испытаны на прогибы и трещины.

В рамках проведения четырехточечного испытания на изгиб наверху плиты для определения зоны сжатия выбираются две симметричные точки нагружения (рисунок 2.30). Для определения прогиба используется электронный тензометрический датчик. Датчик размещается под плитой под углом 90°. Диаметр базальтовой арматуры составляет 10 мм.

Керамзитобетонные плиты и их армирование будут реализованы в 4 (четырёх) вариантах. Ниже описание этих 4 вариантов:

- 3 плиты из облегченного керамзитобетона, усиленных 5Ø10мм на продольном сечении плит и 15Ø10мм на в поперечном сечении плин и дисперсной БФ, длиной 20 мм, диаметром 15 мкм.

- 3 плиты из облегченного керамзитобетона, усиленных базальтовыми арматурами 5Ø10мм на продольном сечении плит и 15Ø10мм на в поперечном сечении плин.

- 3 плиты из облегченного керамзитобетона, усиленного базальтовыми арматурами 5Ø10мм на продольном сечении плит и 15Ø10мм на в поперечном сечении плин + базальто-фибровым полимером (сеткой) с ячейкой 25 x 25 мм.

- 3 плиты из облегченного керамзитобетона, усиленных базальтовыми арматурами 5Ø10мм на продольном сечении плит и 15Ø10мм на в поперечном

сечении плин и дисперсной БФ, длиной 20 мм, диаметром 15 мкм, и базальтофибровым полимером (сеткой) с размером ячеек 25 x 25 мм.

Образцы керамзитобетонных балок показаны на рисунке 2.29.



Рисунок 2.29 - Керамзитобетонные плиты

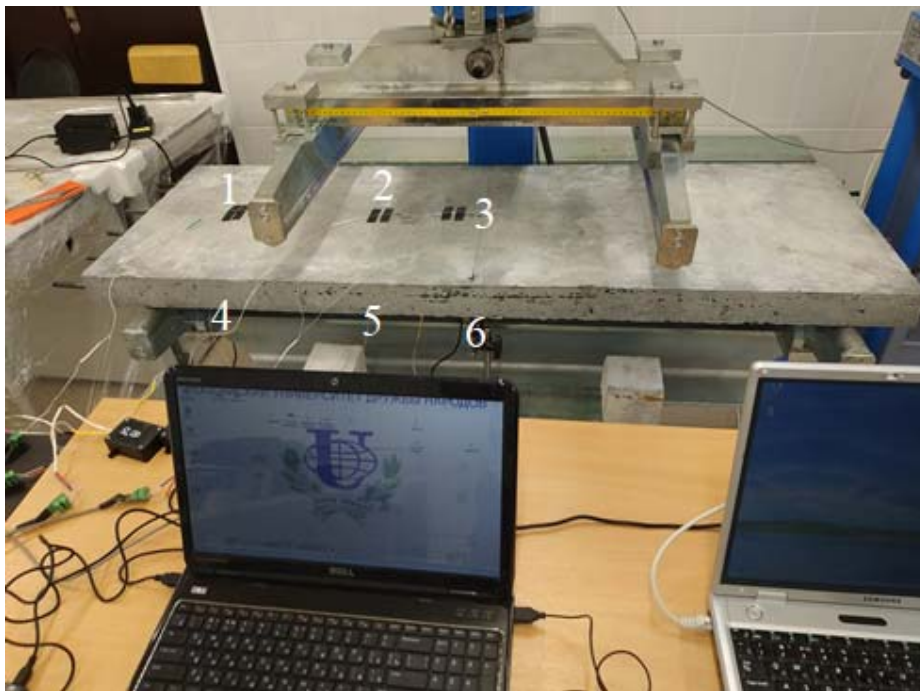


Рисунок 2.30 - Расположение датчика натяжения на керамзитобетонной балке

Шесть тензометрических датчиков расположены на керамзитобетонных плитах и пронумерованы как 1, 2, 3, 4, 5 и 6, как показано на рисунке 2.30 и 2.31а. Датчики 2, 3, 5 и 6 предназначены для измерения трещин и деформаций в зонах сдвига и изгиба балки, а датчики 1 и 4 - для измерения деформаций зоны изгиба. Тензометрические датчики 4, 5 и 6 устанавливаются в зоне натяжения плиты и непосредственно под датчиками 1, 2 и 3 соответственно.

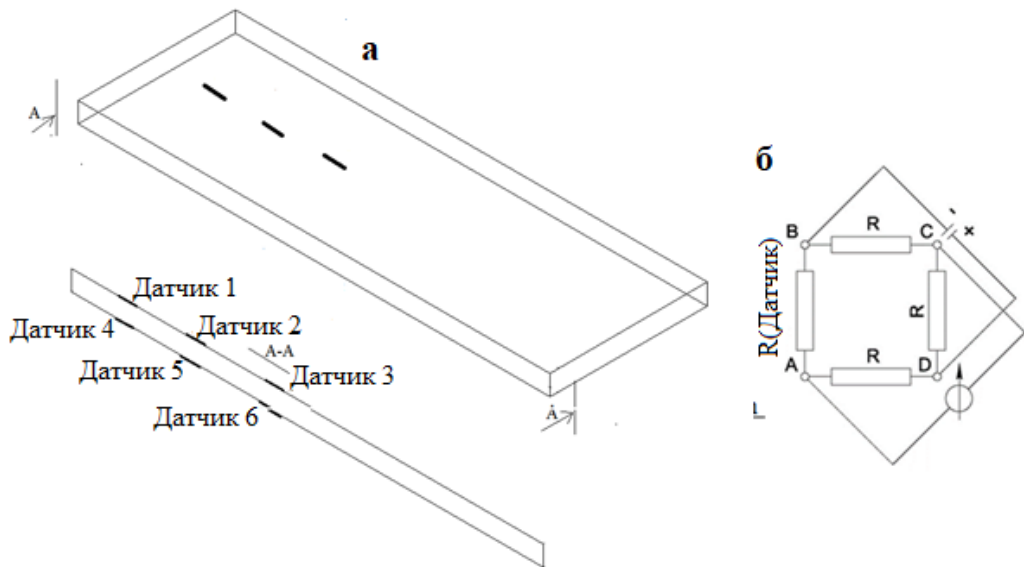


Рисунок 2.31 - Испытание керамзитобетонных плит: а) тензометрические датчики на керамзитобетонных плитах; б) схема подключения тензометрических датчиков

Для регистрации деформаций тензодатчики были подключены к тензометрической станции Zetlab по схеме "полный мост" (рисунок 2.31б). Сопротивление тензометрических датчиков 200 Ом.

2.2 Вывод по голове 2

Из методов проведения экспериментов соблюдались надлежащие процедуры и стандарты. Материалы, используемые в бетонных смесях, одинаковы. Для достижения цели экспериментов была выполнена серия смесей, из которых формировались кубы и призмы и проводились испытания на прочность для получения процентного содержания базальтовой фибры на легком керамзитобетоне. Лучший процент, колонны и балки были отлиты с помощью серии армирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

3.1 Лабораторные экспериментальные результаты

3.1.1 Характеристики рубленого базальтового волокна, способствующие улучшению облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

В данном разделе приведены и проиллюстрированы результаты экспериментов, описанных в разделе 2.1, главы 2 настоящей диссертации.

Испытания на сжатие образцов кубов облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

Результаты, полученные в соответствии с подразделом 2.1.2, проиллюстрированы в настоящем подразделе. Каждый результат в таблице 3.1 представляет собой среднее по 9 образцам керамзитобетонных кубов по соответствующим БФ% и дням испытаний.

Таблица 3.1 - Результаты лабораторных испытаний образцов керамзитобетона размером 100x100x100 мм на прочность на сжатие

Период отверждения, [дней]	Прочность на сжатие, [МПа]				
	0% БФ	0,45% БФ	0,9% БФ	1,2% БФ	1,6% БФ
7	14,156	15,862	18,247	20,191	23,572
14	19,794	21,597	24,972	27,772	31,328
28	22,535	25,122	28,498	31,927	36,236

Экспериментальное исследование керамзитобетонных образцов (таблицы 3.1 и рисунок 3.1) показало, что добавление БФ в керамзитобетон приводит к повышению прочности на сжатие. Результаты также показали, что прочность на сжатие за 7 дней выдерживания может достигать около 60% от прочности на сжатие за 28 дней, независимо от того, содержит ли керамзитобетон БФ. На рисунке 3.1 показан график изменения прочности на сжатие керамзитобетона в зависимости от периода выдерживания.

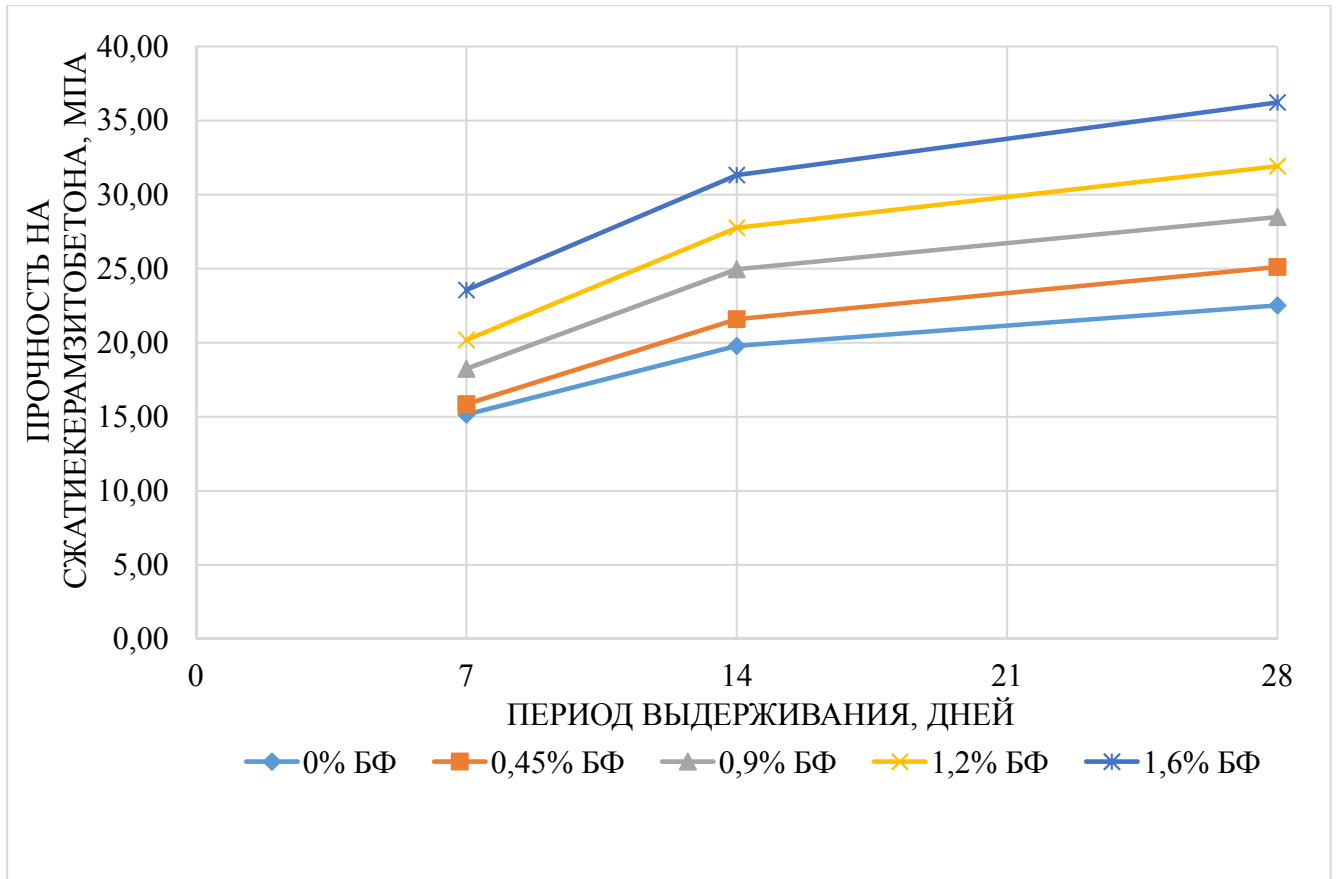


Рисунок 3.1 - Прочность керамзитобетона на сжатие в зависимости от периода выдерживания образцов размером 100x100x100 мм

Зависимость прочности керамзитобетона на сжатие от доли БФ и периода выдерживания проиллюстрирована на рисунке 3.2.

На основе аналитических данных (рисунок 3.2) с использованием теории вероятностей и математической статистики была разработана математическая модель прочности на сжатие керамзитобетона в зависимости от процентного содержания цемента и периода выдерживания (3.1).

$$R_c = R_c^t + \frac{1,245 \cdot t \cdot e^{45 \cdot F}}{e^{45 \cdot F} + \frac{e^{45 \cdot F}}{t_F}}, \quad (3.1)$$

где R_c - прочность на сжатие керамзитобетона, МПа; R_c^t - прочность на сжатие керамзитобетона (без БФ) соответствующей марки на заданный день, МПа; 1,245 - коэффициент изменения прочности на сжатие керамзитобетона с БФ за период, МПа/сут; e - экспоненциальная функция, $e \approx 2,71828$; F - доля БФ в

керамзитобетоне, в относительных единицах; t - период выдерживания, сут ($t \leq 28$ дней); t_F - экспозиция БФ в керамзитобетоне, $t_F = t$, без единиц измерения.

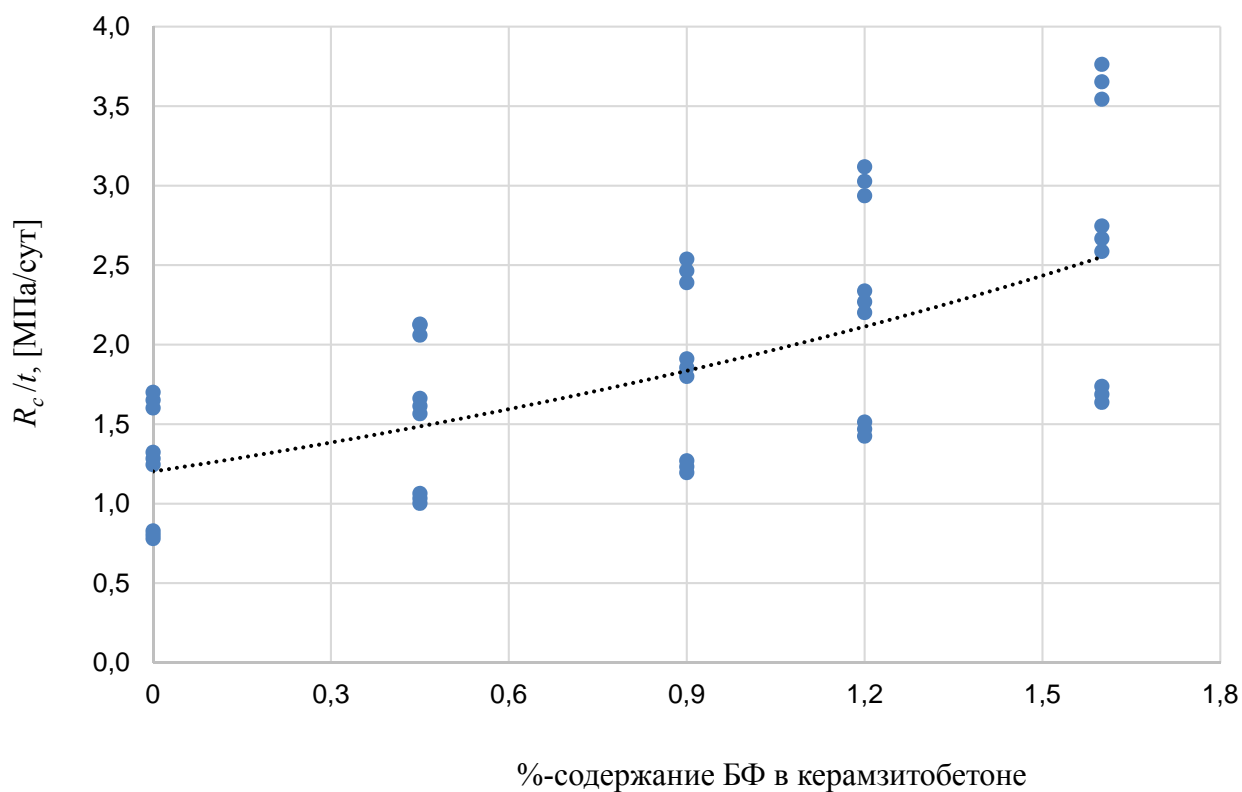


Рисунок 3.2 - Зависимость прочности керамзитобетона на сжатие от процентного содержания БФ и периода выдерживания

Предложенную аналитическую модель целесообразно применять для оценки прочности на сжатие керамзитобетона с точностью $\pm 4-5\%$ и коэффициентом детерминации $R^2 = 0,935$. Он позволяет определить допустимую нагрузку на конструкцию, работающую на сжатие, например, на стены.

Из результатов, приведенных в таблице 3.1, рисунок 3.1 и 3.2, следует, что 1,6% ВФ является лучшим вариантом для добавления в керамзитобетон. Поэтому для последующих экспериментов в рамках настоящей диссертации именно 1,6% БФ принято для армирования керамзитобетонной смеси.

Испытания на изгиб формированных в виде призмы образцов облегченного керамзитобетона с базальтовой фиброй

Как указано в подразделе 2.1.1 для определения прочности на изгиб в экономических соображениях используются образцы керамзитобетона размером 40x40x160 мм. Там же определено оптимальное содержание БФ в керамзитобетонных структурных элементах. Вышесказанное рассмотрено далее в настоящей диссертации. После этого проанализировано меньшее число прямоугольных призм размером 100x100x400 мм для подтверждения результатов, полученных по керамзитобетонным образцам размером 40x40x160 мм. Результаты лабораторных испытаний образцов керамзитобетона размером 40x40x160 мм на прочность на изгиб приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Результаты лабораторных испытаний образцов керамзитобетона размером 40x40x160 мм на прочность на изгиб

Выдерживание бетона, дней	Прочность на изгиб, МПа				
	0% БФ	0,45% БФ	0,9% БФ	1,2% БФ	1,6% БФ
7	0,235	0,377	0,418	0,468	0,611
14	0,359	0,546	0,637	0,737	0,887
28	0,479	0,702	0,783	0,913	1,111

На рисунке 3.3 показан график изменения прочности на изгиб керамзитобетонного образца с размерами 40x40x160 мм в зависимости от периода выдерживания.

Анализ диаграмм рисунка 3.3 и 3.4 показывает, что рост прочности в керамзитобетонных образцах происходит плавно и равномерно, как и в обычном бетоне, независимо от наличия БФ.

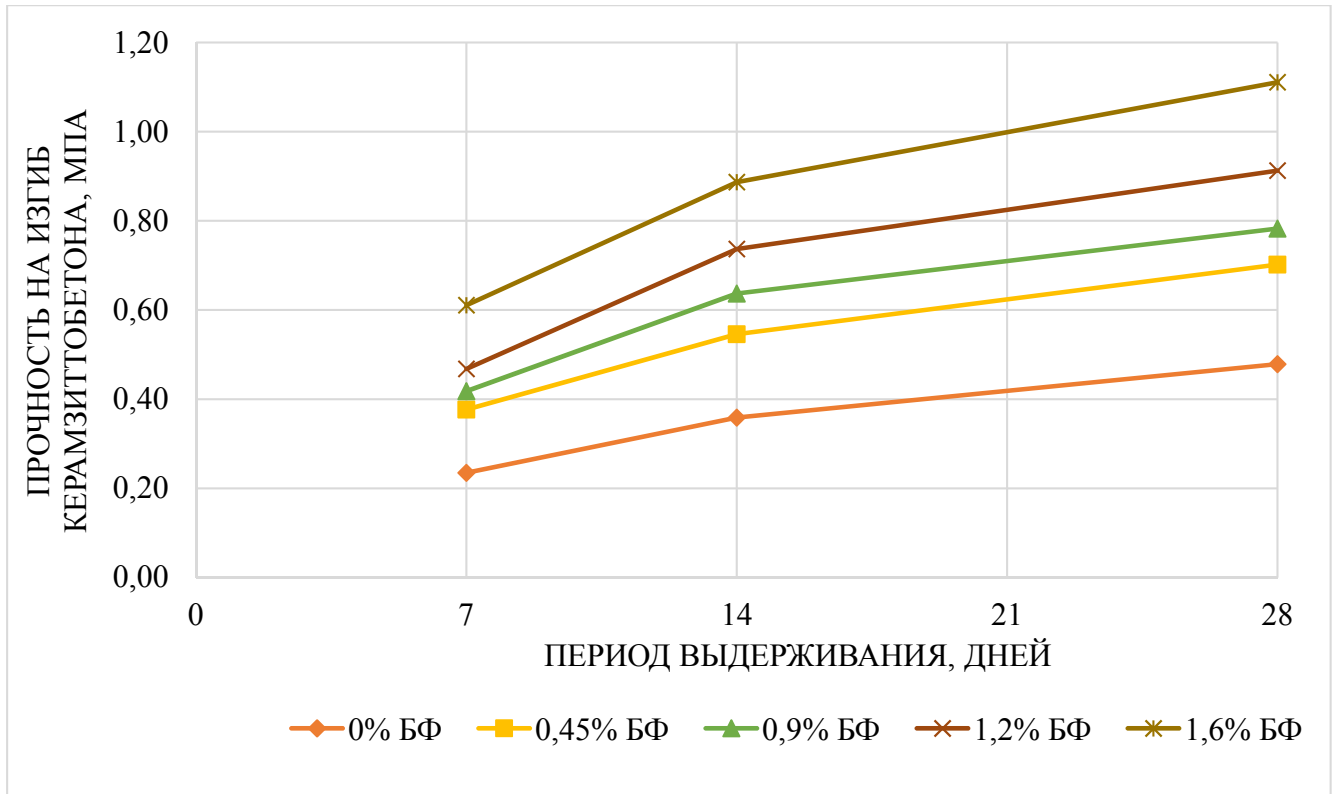


Рисунок 3.3 - Прочность керамзитобетона на изгиб в зависимости от периода выдерживания образцов размером 40x40x160 мм

Результаты лабораторных испытаний образцов из керамзитобетона размером 100x100x400 мм на изгиб приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты лабораторных испытаний образцов керамзитобетона размером 100x100x400 мм на прочность на изгиб

Выдерживание бетона, дней	Прочность на изгиб, МПа				
	0% БФ	0,45% БФ	0,9% БФ	1,2% БФ	1,6% БФ
7	2,422	2,844	3,219	3,728	4,397
14	3,298	3,836	4,411	5,028	5,855
28	3,658	4,278	4,905	5,668	6,488

На рисунке 3.4 показан график изменения прочности на изгиб керамзитобетонного образца с размерами 100x100x400 мм в зависимости от периода выдерживания.

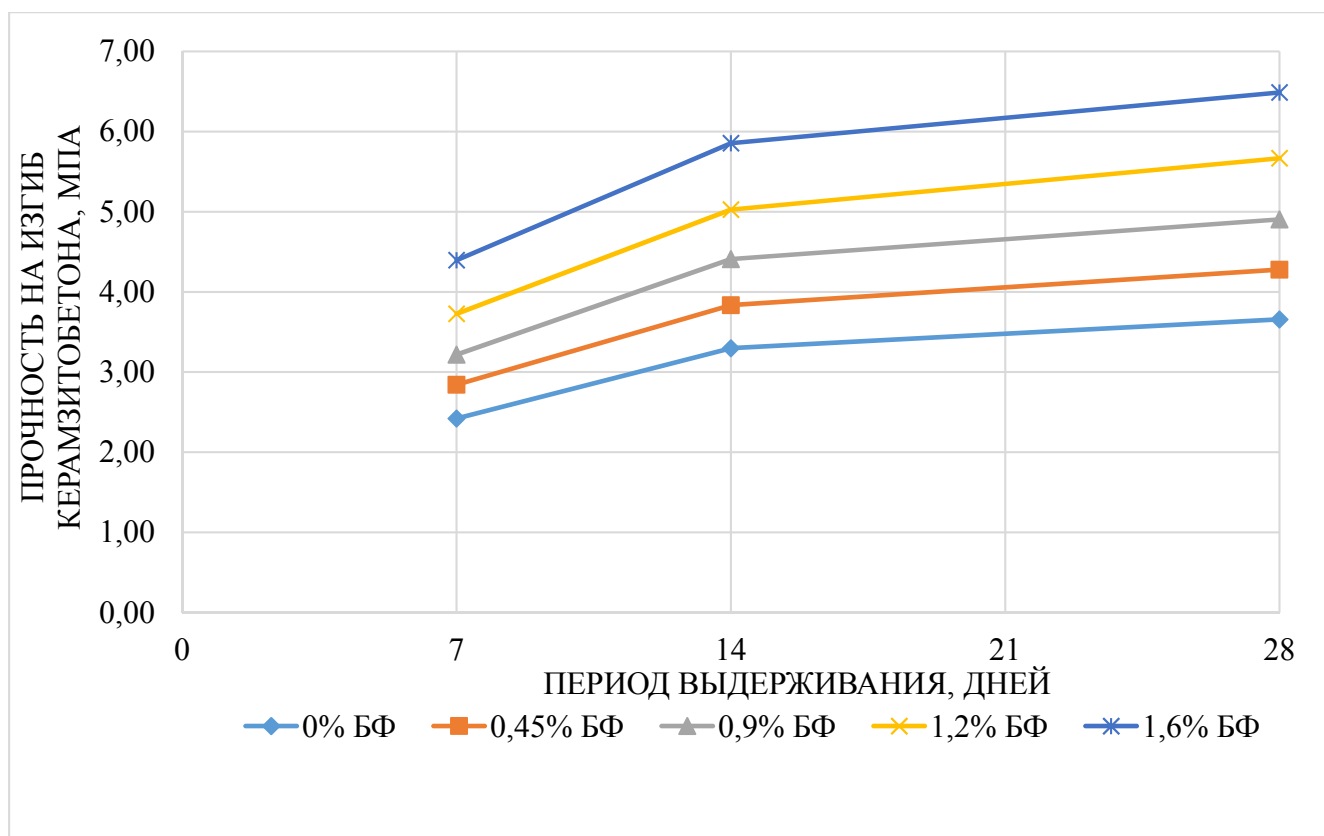


Рисунок 3.4 - Прочность керамзитобетона на изгиб в зависимости от периода выдерживания образцов размером 100x100x400 мм

Анализируя диаграммы на рисунках 3.2 и 3.5, а также таблицы 3.1 и 3.3, можно сделать вывод, что керамзитобетон с 0,9 мас.% БФ увеличивает прочность на сжатие более чем на 20%, в то время как 1,6 мас.% БФ - более чем на 50%, а прочность на изгиб 0,9 мас.% БФ увеличивает более чем на 30%, в то время как 1,6 мас.% БФ - более чем на 75%, т. е. высокий процент содержания БФ в керамзитобетоне дает более высокую прочность.

На рисунке 3.5 показана зависимость прочности на изгиб от доли БФ и периода выдерживания образцов керамзитобетона размером 100x100x400 мм. Анализ диаграмм на рисунке 3.2 и рисунке 3.5 показывает, что характер изменения прочности на сжатие и прочности на изгиб керамзитобетона в зависимости от доли БФ и периода выдерживания идентичен и растет экспоненциально.

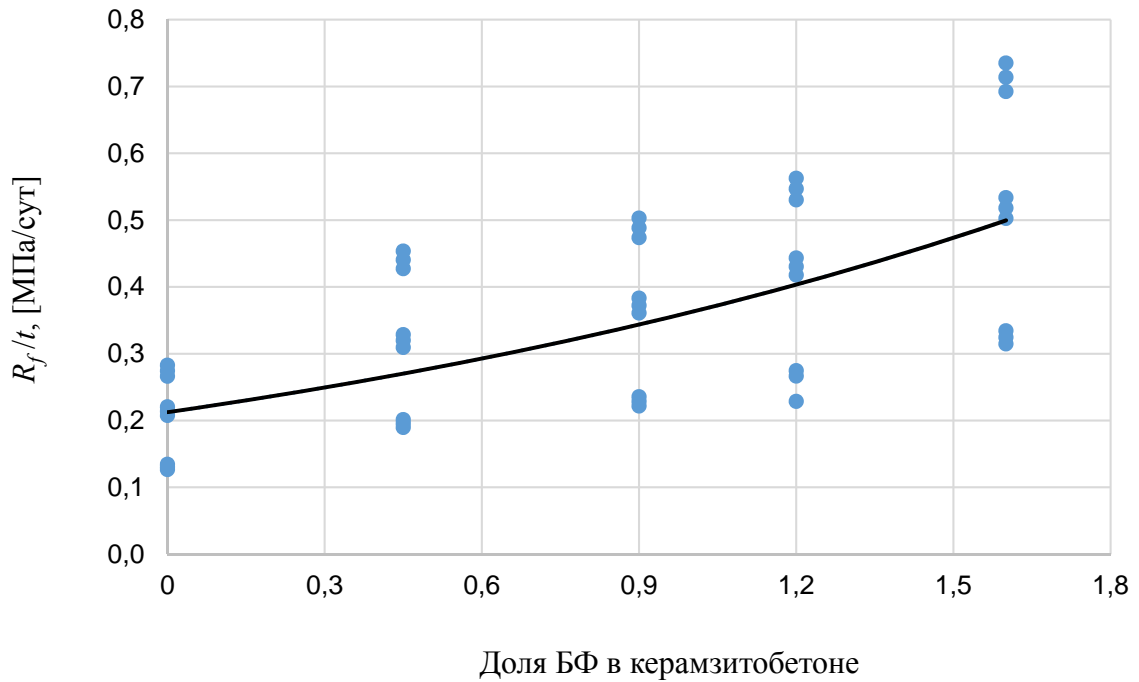


Рисунок 3.5 - Зависимость прочности на изгиб от доли БФ и периода выдерживания образцов керамзитобетона размером 100x100x400 мм

На основе аналитических данных (рисунок 3.5) с использованием теории вероятностей и математической статистики была разработана математическая модель прочности на изгиб керамзитобетона в зависимости от процентного содержания цемента и периода выдерживания (3.2).

$$R_f = R_f^t + \frac{0.215 \cdot t \cdot e^{53 \cdot F}}{e^{53 \cdot F} + \frac{t}{t_F}} \quad (3.2)$$

где R_f - прочность на изгиб керамзитобетона, МПа; R_f^t - прочность на изгиб керамзитобетона (без БФ) соответствующей марки на заданный день, МПа; 0,215 - коэффициент изменения прочности на изгиб керамзитобетона с БФ за период, МПа/сут; e - экспоненциальная функция, $e \approx 2.71828$; F - доля БФ в керамзитобетоне, в относительных единицах; t - период выдерживания, сут ($t \leq 28$ дней); t_F - экспозиция БФ в керамзитобетоне, $t_F = t$, без единиц измерения.

Предложенную аналитическую модель целесообразно применять для оценки прочности на изгиб керамзитобетона с точностью $\pm 4-5\%$ и коэффициентом

детерминации $R^2 = 0,927$. Она позволяет определить допустимую нагрузку на конструкцию, работающую на изгиб, например, на плиты перекрытий.

Испытания на изгиб показывают, что добавление 1,6% БФ в керамзитобетон дает наилучшие прочностные результаты. Поэтому именно 1,6% БФ принимается для конструктивных бетонных элементов, работающих на изгиб.

Результаты испытаний армированного базальтовой фиброй керамзитобетона на растяжение со скалыванием

Приведены средние значения результатов испытания на растяжение при скалывании по трем образцам для каждого варианта смеси (см. таблицу 3.4). С увеличением нагрузки трещины возникали и развивались в вертикальном направлении. Количество и ширина трещин постепенно увеличивались по мере увеличения сжимающего напряжения. Наконец, бетонный куб достиг предела прочности на растяжение со скалыванием с образованием резкой глубокой трещины после развития по всему образцу основной трещины. Результаты испытаний на прочность на растяжение при скалывании (см. таблицу 3.4 и рисунок 3.6). Плотность кубов из облегченного керамзитобетона колеблется от 1400кг/м³ до 1500кг/м³.

Таблица 3.4 - Прочность на растяжение при скалывании облегченного керамзитобетона с БФ (МПа)

% базальтовой фибры	Прочность на растяжение при скалывании (МПа)		
	День 7-й	День 14-й	День 28-й
0	1,015	1,407	2,415
0,45	2,007	2,933	3,831
0,9	2,820	3,192	4,113
1,2	3,147	3,911	4,839
1,6	3,477	4,176	5,258

На основе аналитических данных (см. рисунок 3.7 и таблицу 3.5) с использованием теории вероятностей и математической статистики была разработана аналитическая модель прочности керамзитобетона на растяжение при скалывании в зависимости от процентного содержания цемента и периода выдерживания.

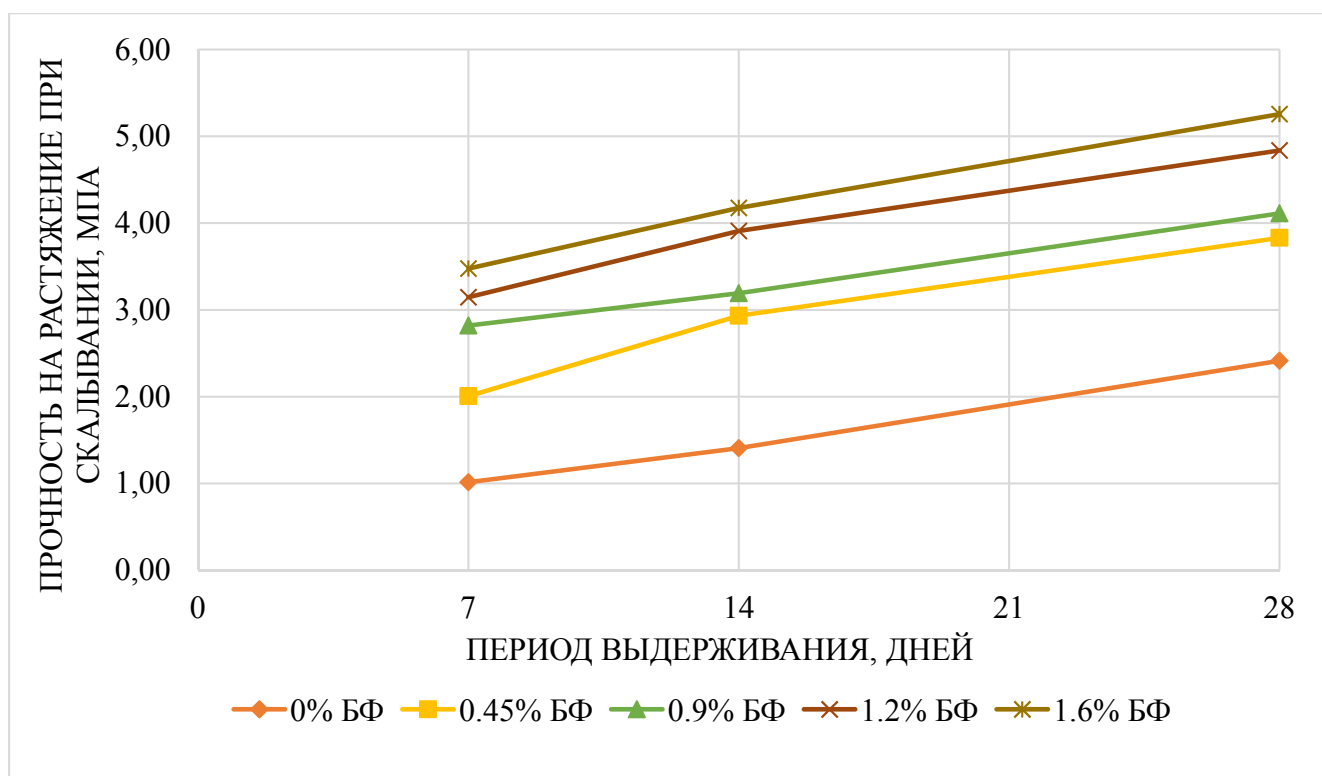


Рисунок 3.6 - Прочность на растяжение при скалывании облегченного керамзитобетона с БФ

Таблица 3.5 - Зависимость прочности керамзитобетона на растяжение при скалывании от процентного содержания БФ и периода выдерживания

% базальтовой фибры	Пр [МПа]		
	День 7-й	День 14-й	День 28-й
0	1,176	1,704	2,753
0,45	1,913	2,439	3,489
0,9	2,649	3,176	4,227
1,2	3,141	3,667	4,718
1,6	3,797	4,322	5,374

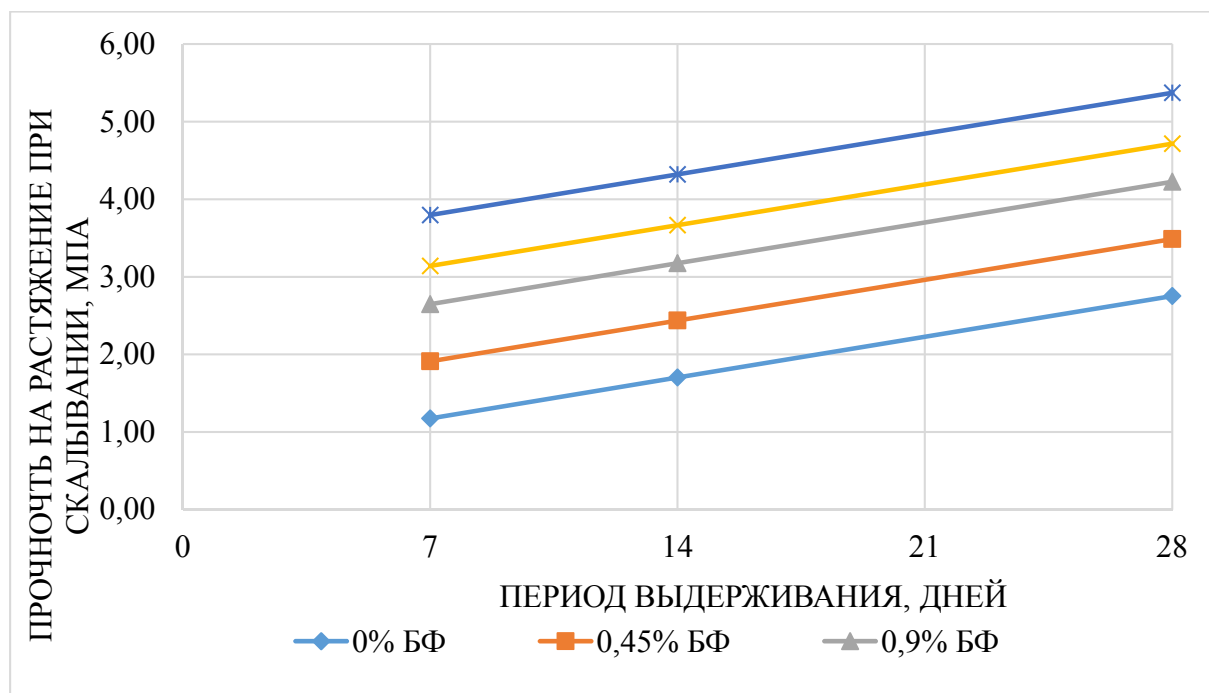


Рисунок 3.7 - Зависимость прочности керамзитобетона на растяжение при скалывании от процентного содержания БФ и периода выдерживания

Уравнение регрессии построено с помощью программы Minitab. Соотношение между процентным содержанием базальтовой фибры и временем выдерживания в днях была представлена ниже (3.3), где Пр - прочность на растяжение при скалывании керамзитобетона в Мпа; t - период выдерживания, дней ($t \leq 28$ дней); f - доля БФ в керамзитобетоне, по таблице 3.4. R^2 равен 95,73%.

$$\text{Пр} = 0,650 + 1,638f + 0,07510t \quad (3.3)$$

Результаты исследования рабочих параметров БФ в данной диссертации в основном подтверждают результаты испытаний на прочность на растяжение при скалывании в работах М.-Н. Zhang и О.Е. Gjorv [165]. ASTM C496 [65]. Из результатов, приведенных в таблице 3.4, следует, что максимальное увеличение прочности на растяжение при скалывании составляет 42,6% за 7 дней, 96,8% за 14 дней и 17,7% через 28 дней. Прочность на растяжение при скалывании облегченного керамзитобетона с БФ возрастает с увеличением содержания БФ до 1,6%. Это изменение прочности обусловлено степенью уплотнения, долей

бетонной смеси, размером заполнителя, скоростью нагружения во время испытаний и добавками для бетонной смеси.

3.1.2 Результаты пределы прочности конструктивных элементов из армированного базальтоволокнистым полимером облегченного керамзитобетона с дисперсной базальтовой фиброй

Результаты и анализ керамзитобетонных цилиндрических колонн

Пористость (γ), определяемая объемной долей водопроницаемых пор, содержащихся в образце затвердевшего бетона, определяется в соответствии с АВНТ. NBR 9779 [47] по (3.4):

$$\gamma = \frac{M_{sat} - M_s}{M_{sat} - M_i} \quad (3.4)$$

где M_{sat} - вес водонасыщенного образца; M_s - вес сухого образца; и M_i - вес водонасыщенного образца, погруженного в воду. Показатели пористости трех типов керамзитобетонных цилиндров приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6- Пористость облегченного керамзитобетона

Тип керамзитобетона	M_{sat} , кг	M_s , кг	M_i , кг	γ
Неармированный керамзитобетонный цилиндр (тип цилиндра 1)	12,75	8,01	11,83	4,98
Керамзитобетонный цилиндр, усиленный БФ (тип цилиндра 2)	13,15	8,85	12,35	5,37
Керамзитобетонный цилиндр, усиленный БФ и базальтовой сеткой (тип цилиндра 3)	13,62	8,91	12,91	6,63

С помощью уравнения (3.4) получаем, что включение базальтовой фибры в бетонную смесь приводит к пористости около 5,37, усиление базальтовой сеткой дает 6,63, по сравнению с 4,98 у неармированного керамзитобетона.

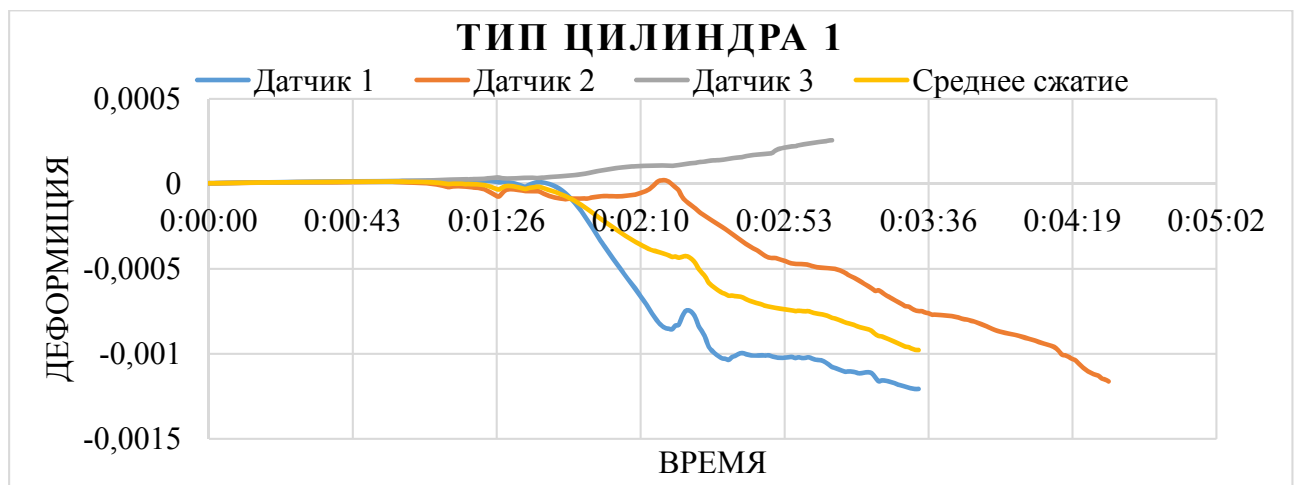
Неармированная керамзитобетонная цилиндрическая колонна (тип цилиндра 1). На рисунках 3.8, 3.9, 3.14, 3.16, 3.17 и рисунке 3.18 показаны результаты по керамзитобетонным цилиндрическим колоннам (тип цилиндра 1)

после приложения нагрузки. Из экспериментов следует, что керамзитобетонная цилиндрическая колонна выдержала нагрузку до 19,6 тонн. Деформации измерялись с шагом в 5 тонн.



Рисунок 3.8 - Деформация керамзитобетонного цилиндрического колонна на датчики после приложения нагрузки (тип цилиндра 1)

На рисунке 3.9 даны показания датчиков при нагружении. Датчик 1 (синяя кривая), датчик 2 (оранживая кривая) и датчик 3 (серая кривая), а среднее сжатие (жёлтая кривая). На рисунке 3.9 датчик 1 продолжал считывание с 18:53:00 с деформацией 0,000004 до 18:56:33 с деформацией -0,001206, датчик 2 - с 18:53:00 с деформацией 0,000004 до 18:57:30 с деформацией -0,001162, а датчик 3 - с 18:53:00 с деформацией 0,000004 до 18:56:07 с деформацией -0,000257.



Рисисунок 3.9 - Время-деформация со средним сжатием цилиндра типа 1

Цилиндрическая керамзитобетонная колонна, армированная БФ (цилиндр типа 2). На рисунках 3.10, 3.11, 3.14, 3.16, 3.17 и 3.19 показаны результаты по керамзитобетонным цилиндрическим колоннам с БФ (тип цилиндра 2) после приложения нагрузки. Из экспериментов следует, что керамзитобетонная цилиндрическая колонна с БФ выдерживает нагрузку до 26,67 тонн. Деформации измерялись с шагом в 5 тонн.



Рисунок 3.10 - Деформация керамзитобетонного цилиндрического колонна на датчики после приложения нагрузки (тип цилиндра 2): 1) показывает деформацию у датчика 1; 2) показывает деформацию у датчика 2; 3) показывает деформацию у датчика 3.

На рисунке 3.11 даны показания датчиков: датчик 1 (синяя кривая), датчик 2 (оранжевая) и датчик 3 (серая). На рисунке 3.11 датчик 1 продолжал считывание с 18:53:00 с деформацией 0,000023 до 18:54:50 с деформацией -0,00136, датчик 2 в 18:53:00 имел 0 (нулевую) деформацию, продолжал считывание с 15:53:09 с деформацией -0,000012 до 18:53:59 с деформацией -0,000575, а датчик 3 - с 18:53:00 с деформацией 0,000011 до 18:53:59 с деформацией 0,000127.

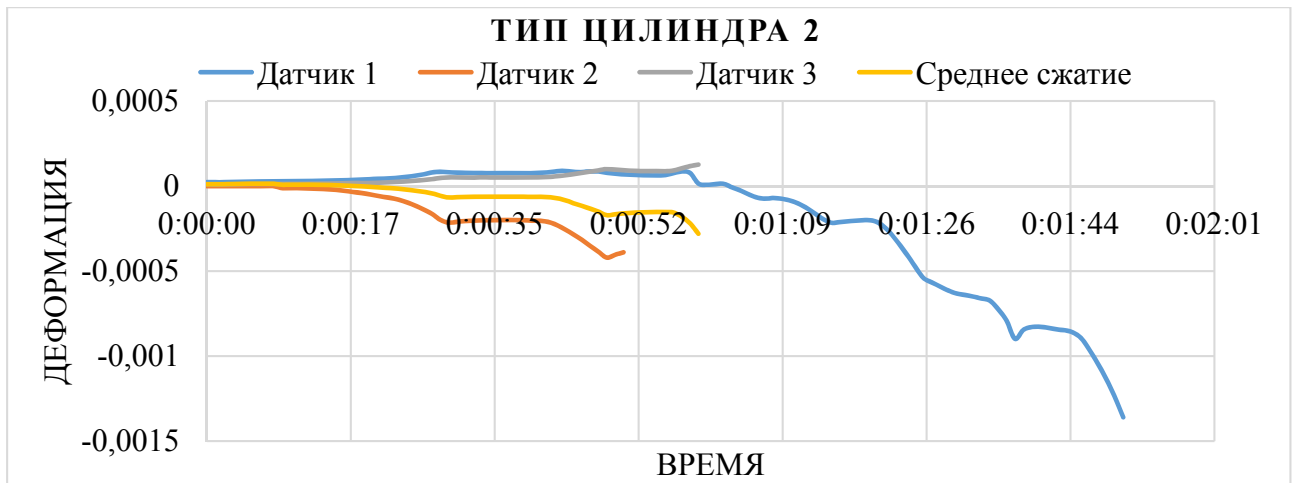


Рисунок 3.11 - Время-деформация со средним сжатием цилиндра типа 2

Керамзитобетонная цилиндрическая колонна с БФ и базальтовой сеткой (тип цилиндра 3). На рисунках 3.12, 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17 и 3.20 показаны результаты по керамзитобетонным цилиндрическим колоннам с БФ и базальтовой сеткой (тип цилиндра 3) после приложения нагрузки. Керамзитобетон с БФ и базальтовой сеткой выдержал нагрузку до 29 тонн.

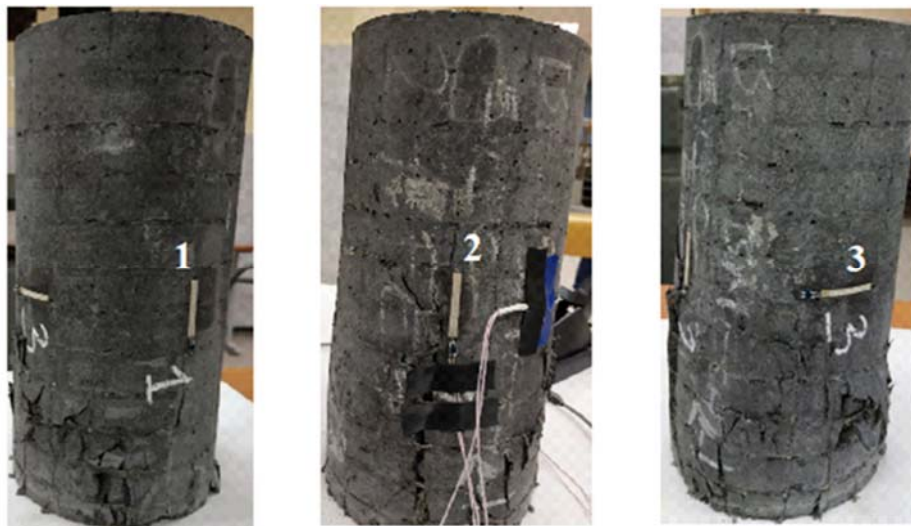


Рисунок 3.12 - Керамзитобетонная цилиндрическая колонна с БФ и базальтовой сеткой после приложения нагрузки (тип цилиндра 3): 1) показывает деформацию у датчика 1. 2) показывает деформацию у датчика 2. 3) показывает деформацию у датчика 3.

На рисунке 3.13 даны показания датчиков: датчик 1 (синяя кривая), датчик 2 (оранжевая) и датчик 3 (серая). На рисунке 3.13 датчик 1 продолжал считывание с 18:53:00 с деформацией 0.000014 до 18:54:40 с деформацией -0.001466, датчик 2 - с 18:53:00 с деформацией 0,000004 до 18:54:40 с деформацией -0.001889, а датчик 3 - с 18:53:00 с деформацией 0.000013 до 18:54:30 с деформацией 0.0002.

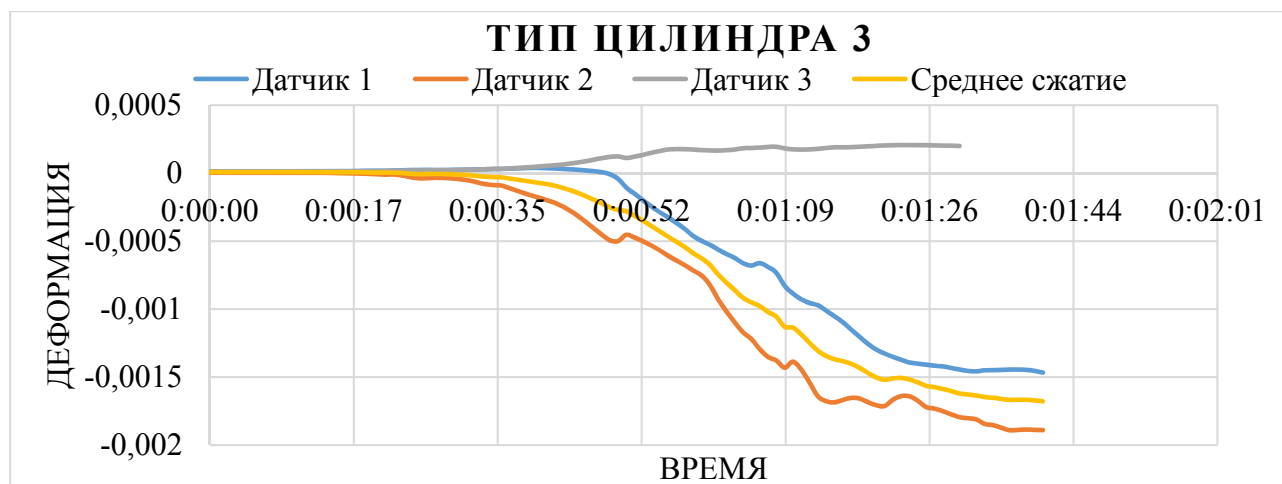


Рисунок 3.13 - Время-деформация со средним сжатием цилиндра типа 3

На рисунке 3.14 показаны графики времени-деформации по 3 (трем) датчикам на цилиндрах 3(трех) типов.

На рисунке 3.14а видно, что датчик 1 на цилиндре типа 1 выдержал дольше (3 минуты 33 секунды) по сравнению с двумя другими цилиндрами: 1 минута 50 секунд у цилиндра типа 2 и 1 минута 40 секунд у цилиндра типа 3.

На рисунке 3.14б видно, что датчик 1 на цилиндре типа 1 выдержал дольше (4 минуты 30 секунд) по сравнению с двумя другими цилиндрами: 59 секунд у цилиндра типа 2 и 1 минута 40 секунд у цилиндра типа 3.

На рисунке 3.14в видно, что датчик 1 на цилиндре типа 1 выдержал дольше (3 минуты 03 секунды) по сравнению с двумя другими цилиндрами: 59 секунд у цилиндра типа 2 и 1 минута 30 секунд у цилиндра типа 3.

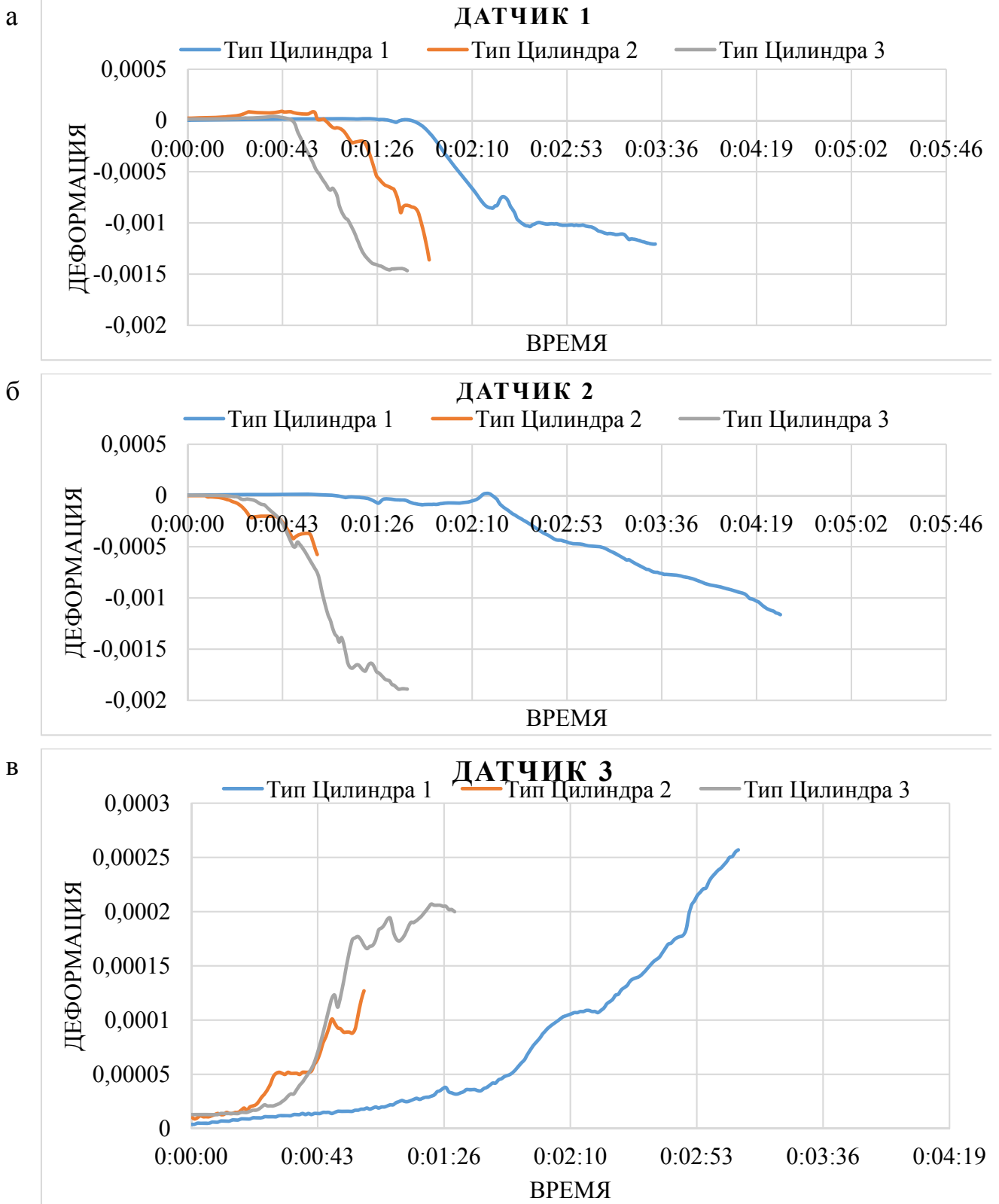


Рисунок 3.14 - Время-деформация керамзитобетонной цилиндрической колонны: а) график времени-деформации по датчику 1 в 3 (трех) типах цилиндров; б) график времени деформации по датчику 2 в 3 (трех) типах цилиндров; в) график времени-деформации по датчику 3 в 3 (трех) типах цилиндров.

Диаграмма деформации-напряжения керамзитобетонных цилиндрических колонн типа 3 проиллюстрирована на рисунке 3.15. Схема деформации керамзитобетона при сжатии, показанная на рисунке 3.15, может быть аппроксимирована полиномом третьей степени (пунктирной линией) (3.5):

$$\sigma(\varepsilon) = \alpha_0 + \alpha_1 \varepsilon^3 + \alpha_2 \varepsilon^2 + \alpha_3 \varepsilon, \quad (3.5)$$

где σ - напряжение; ε - деформация; $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ - постоянные коэффициенты. Значения постоянных коэффициентов являются $\alpha_0 = -1,4743, \alpha_1 = 2 * 10^{10}, \alpha_2 = 4 * 10^7, \alpha_3 = 30659$.

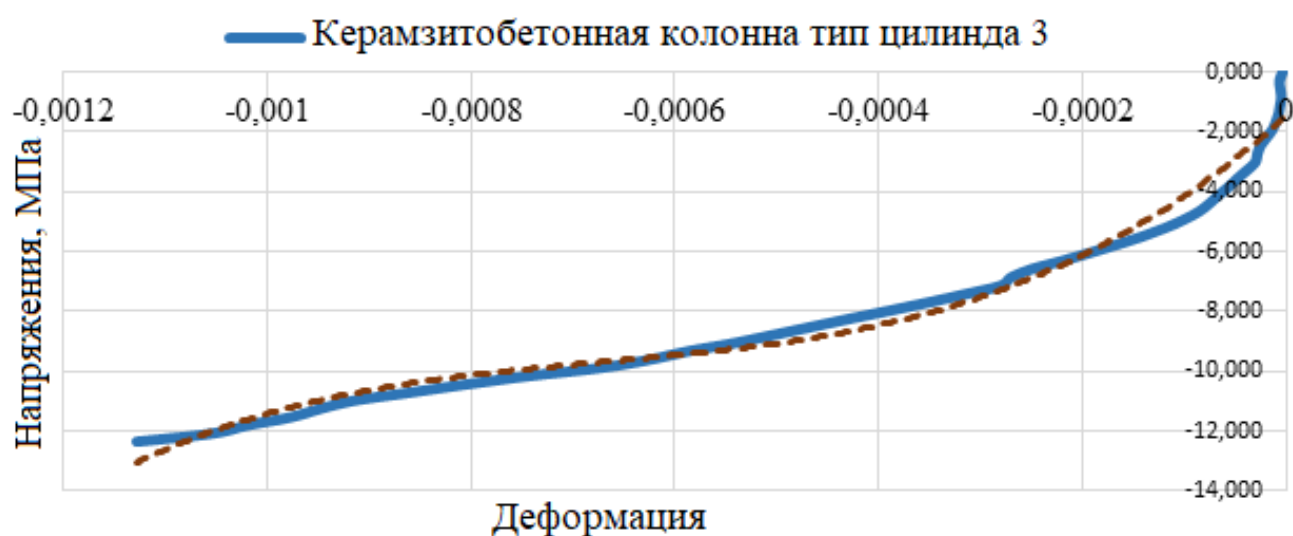


Рисунок 3.15 - Напряжение–деформация цилиндрической керамзитобетонной колонны типа 3

Механические свойства керамзитобетонных цилиндрических колонн приведены в таблице 3.7, а на рисунке 3.16 показана прочность на сжатие керамзитобетонных цилиндрических колонн, усиленных БФ, также БФ и базальтовой сеткой.

Таким образом, было установлено, что БФ + базальтовая сетка создают "эффект клетки", тем самым увеличивая прочность цилиндрических керамзитобетонных колонн на 48% и уменьшая коэффициент Пуассона на 39%.

Таблица 3.7 - Механические свойства цилиндрических керамзитобетонных колонн

Тип бетона	Прочность на сжатие, f_c [МПа]	Средний коэффициент Пуассона, ν	Начальный модуль упругости, E_0 (МПа)
Неармированный керамзитобетонный цилиндр	10,9	0,278	-
Керамзитобетонный цилиндр, усиленный БФ	14,8	0,246	-
Керамзитобетонный цилиндр, усиленный БФ и базальтовой сеткой	18,5	0,17	9600

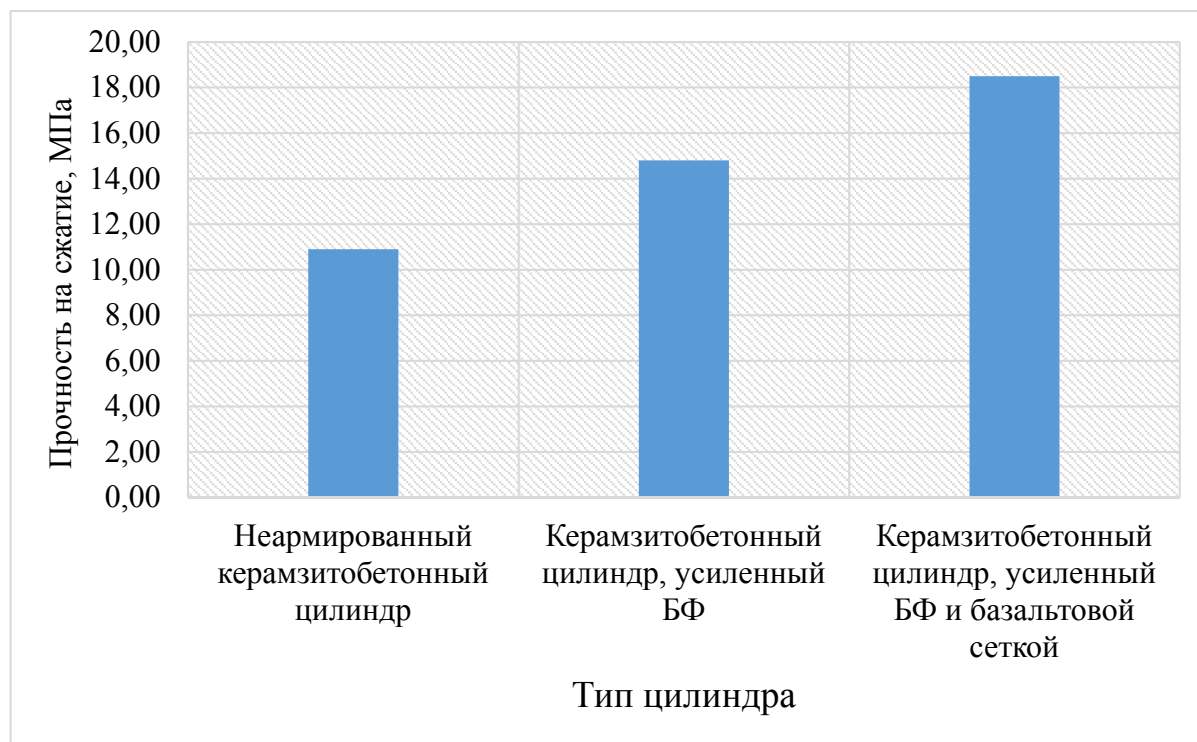


Рисунок 3.16 - Прочность на сжатие цилиндрических колонн из керамзитобетона

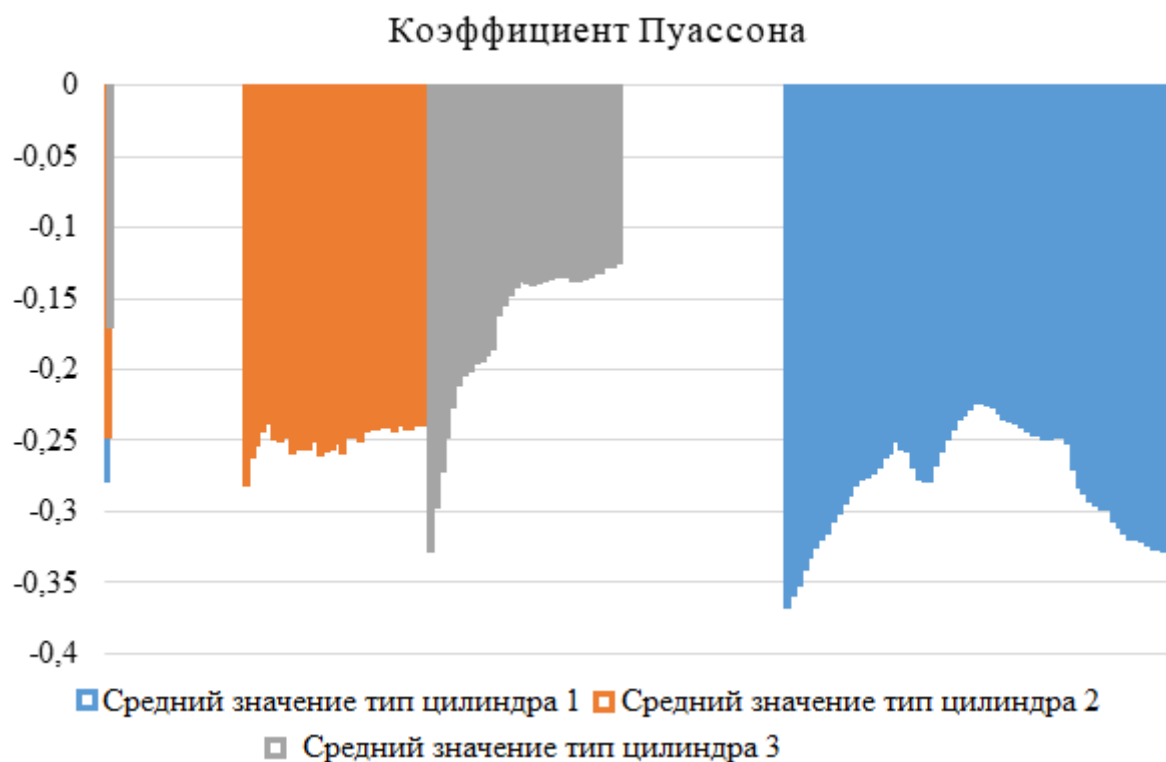


Рисунок 3.17 - Сравнение коэффициента Пуассона цилиндров типа 1, 2 и 3

На рисунке 3.18 даны показания датчиков при нагружении, время-деформация цилиндрической колонны из керамзитобетона (цилиндр типа 1) из тензометрической станции Zetlab. Датчик 1 (зеленая кривая), датчик 2 (красная) и датчик 3 (синяя).

На рисунке 3.19 даны показания датчиков при нагружении, время-деформация цилиндрической колонны из керамзитобетона с базальтовой фиброй (цилиндр типа 2) из тензометрической станции Zetlab. Датчик 1 (зеленая кривая), датчик 2 (синяя) и датчик 3 (красная).

На рисунке 3.20 даны показания датчиков при нагружении, время-деформация цилиндрической колонны из керамзитобетона с базальтовой фиброй, усиленной базальтовой сеткой (цилиндр типа 3) из тензометрической станции Zetlab датчик 1 (зеленая кривая), датчик 2 (синяя) и датчик 3 (красная).

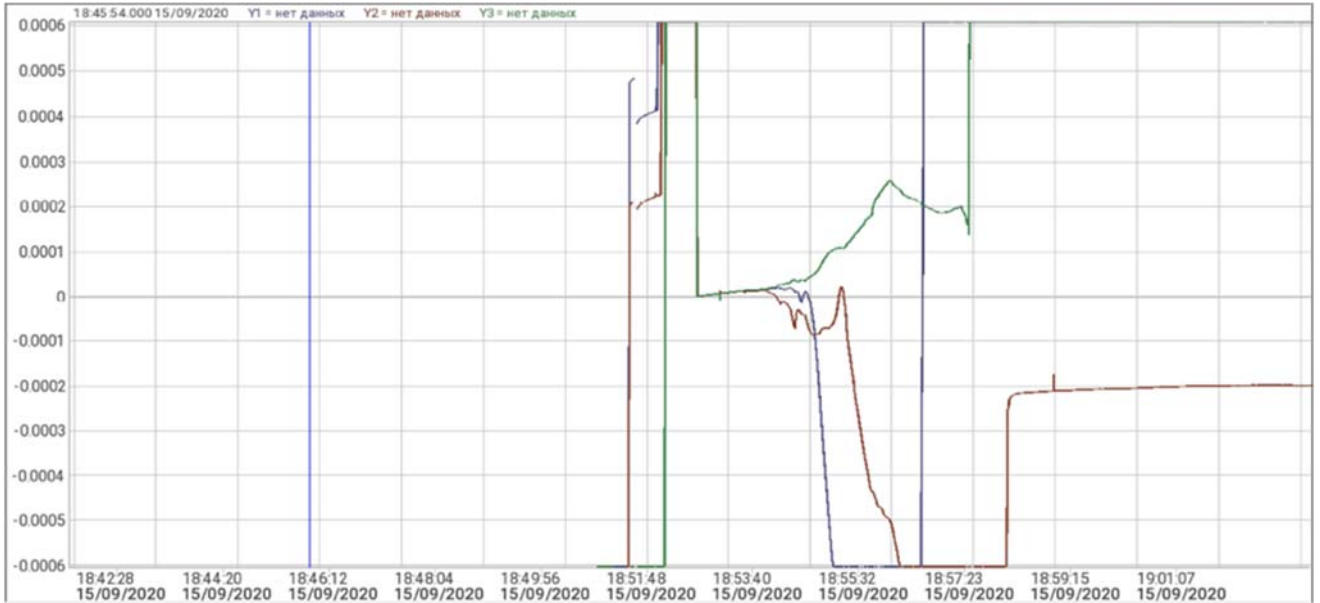


Рисунок 3.18 - Время-деформация цилиндрической колонны из керамзитобетона (цилиндр типа 1) из тензометрической станции Zetlab

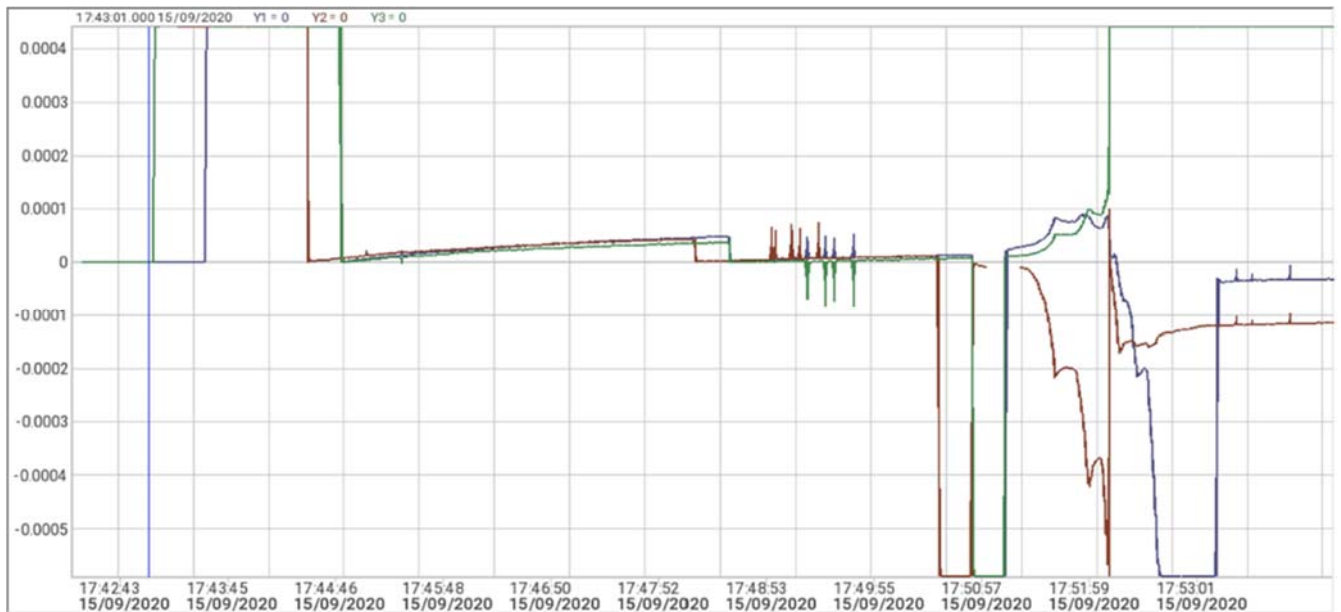


Рисунок 3.19 - Время-деформация цилиндрической колонны из керамзитобетона с базальтовой фиброй (цилиндр типа 2) из тензометрической станции Zetlab

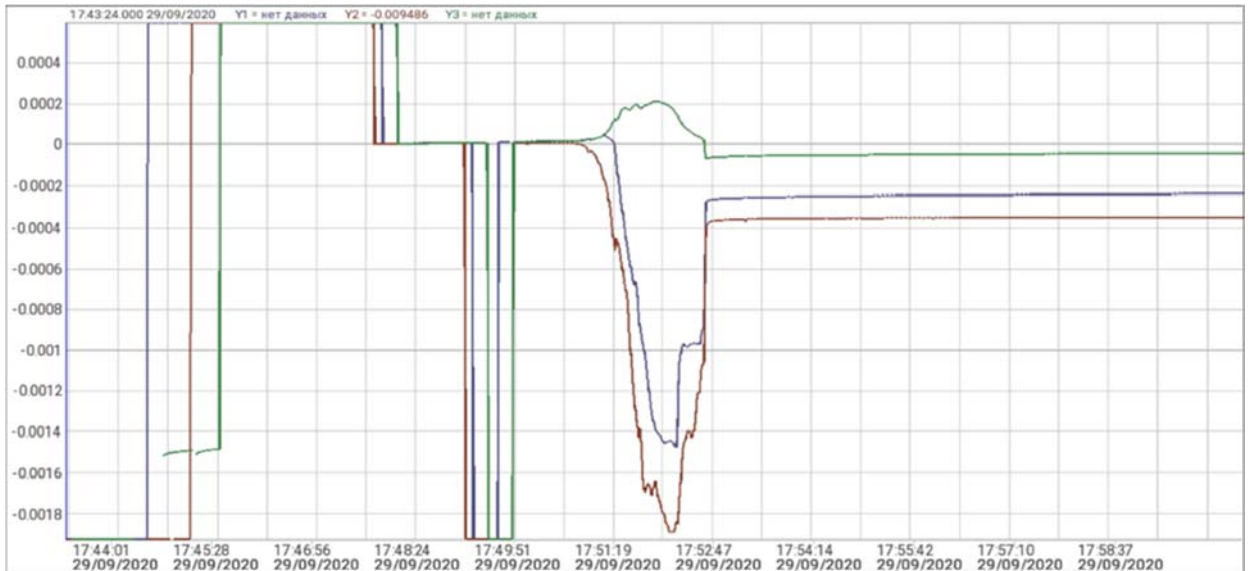


Рисунок 3.20 - Время-деформация цилиндрической колонны из керамзитобетона с базальтовой фиброй, усиленной базальтовой сеткой (цилиндр типа 3) из тензометрической станции Zetlab

Результаты и анализ керамзитобетонной балки

Результаты испытаний на прогиб керамзитобетонной балки проиллюстрированы ниже. В рамках проведения четырехточечного испытания на изгиб наверху балки для определения зоны сжатия выбираются две симметричные точки нагружения (см. рисунок 3.21).

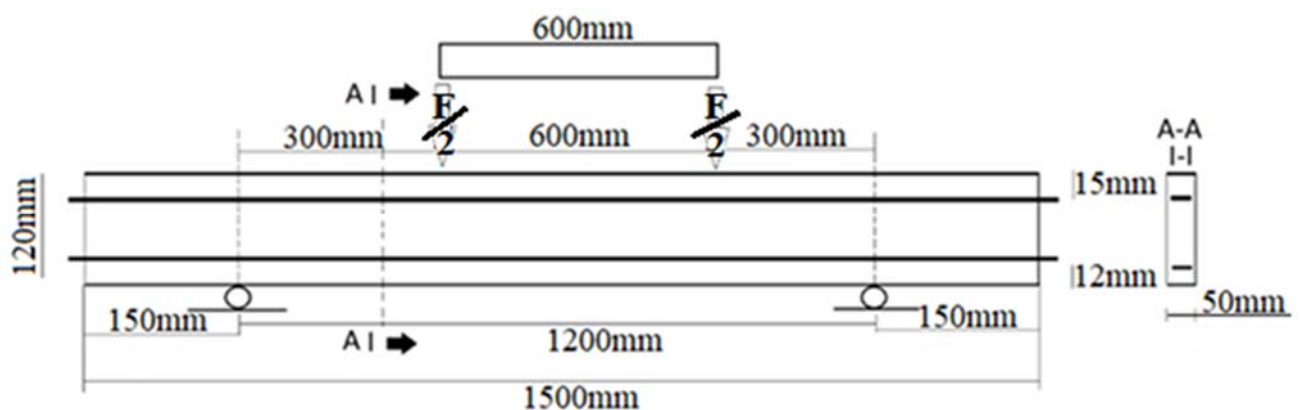


Рисунок 3.21 - Нагружение керамзитобетонной балки

- **Балка типа 1: Балки из облегченного керамзитобетона, усиленные двумя базальтовыми арматурами $2\text{Ø}10$ мм.** На рисунке 3.22 представлена изогнутая балка из облегченного керамзитобетона, усиленного $2\text{Ø}10\text{mm}$ базальтовой арматурой без дисперсной базальтовой фибры.



Рисунок 3.22 - Испытание на прогиб керамзитобетонной балки с базальтовой арматурой (Балка типа 1)

Балка из облегченного керамзитобетона длиной 1500мм x шириной 50 мм x толщиной 120 мм базальтовой арматурой $2\text{Ø}10$ мм, без дисперсной фибры. Средние результаты испытаний на прогиб 6 балок на 28-й день выдерживания приведены в рисунке 3.22 и рисунке 3.27.

При проведении экспериментальных испытаний керамзитобетонной балки с дисперсной базальтовой фиброй и базальтовой арматурой ширина первой трещины в растянутой бетонной балке для измеренного и скорректированного составляет 3,64 и 2,573 мм соответственно при нагрузке до 4 кН. Однако ширина трещины балки в растянутой зоне для измеренного и скорректированного составляет 4,34 мм и 3,068 мм соответственно при приложенной нагрузке 4,9 кН. А ширина разрушения балки от плоскости скалывания у фиксатора для измеренного и скорректированного составляет 6,07 мм и 4,291 мм соответственно при приложении нагрузки 7,1 кН. В таблице 3.8 показаны проявления трещин на керамзитобетоне с базальтовой арматурой.

Таблица 3.8 - Растрескивание керамзитобетонной балки с дисперсной базальтовой фиброй и базальтовой арматурой (Балка типа 1)

Нагрузка (кН)	Прогиб (мм)	Комментарии
4	2,57348	Первая трещина в растянутом бетоне
4,9	3,06838	Развитие трещин
7,1	4,29149	Разрушение от плоскости скалывания

Балка типа 2: Балки из облегченного керамзитобетона, усиленных двумя базальтовыми арматурами $2\Phi 10$ мм и дисперсной БФ, длиной 20 мм, диаметром 15 мкм. На рисунке 3.23 представлена изогнутая балка из облегченного керамзитобетона, усиленного 2 базальтовыми арматурами и дисперсной базальтовой фиброй.



Рисунок 3.23 - Испытание на прогиб керамзитобетонной балки с дисперсной базальтовой фиброй и базальтовой арматурой (Балка типа 2)

В ходе экспериментального испытания прогиб балки наблюдался 1,796 мм при приложении нагрузки 2,7 кН. Однако, когда ширина трещины балки находится в зоне натяжения, прогиб составляет 2,446 мм при приложении нагрузки 3,6 кН. А ширина разрушения балки от расщепления опоры с прогибом 2,884 мм при

приложении нагрузки 4,2 кН., см. таблицу 3.8 ниже. В таблице 3.9 показаны проявления трещин на керамзитобетоне с базальтовой арматурой.

Таблица 3.9 - Растрескивание керамзитобетонной балки с базальтовой арматурой (Балка типа 2)

Нагрузка (кН)	Прогиб (мм)	Комментарии
2,7	1,79578	Заметная трещина
3,6	2,44622	Трещина в растянутой зоне
4,2	2,88456	Разрушение от плоскости скалывания



Рисунок 3.24 - Расположением датчиков на керамзитобетонной балке

На рисунке 3.24 показано расположение тензометрических датчиков 1, 2 и 3 на балках 1 и 2 и прогибомера ("deflection gauge").

Балка типа 3: Балки из облегченного керамзитобетона, усиленные одной базальтовой арматурой 1Ø10 мм и одной стальной арматурой 1Ø10 мм в области балки, работающей на растяжение, и дисперсной БФ. Результаты и механические влияние на балку показаны на рисунке 3.25. Средние результаты испытаний на прогиб 6 балок на 28-й день периода выдерживания были использованны. Балка рухнула в зоне сдвига. Сначала на балке были видны трещины от изгиба, затем трещина от сдвига + трещина от изгиба.



Рисунок 3.25 - Испытание на прогиб керамзитобетонной балки с дисперсной базальтовой фиброй, базальтовой и стальной арматурой (Балка типа 3)

Балка типа 4. Балки из облегченного керамзитобетона, усиленные двумя базальтовыми арматурами $2\Phi 10$ мм, дисперсной БФ, длиной 20 мм, диаметром 15 мкм, и базальтофибровым полимером (сеткой) с размером ячеек 25 x 25 мм. Балка из облегченного керамзитобетона, длиной 1500мм x шириной 50мм x толщиной 120мм с базальтовой арматурой $2\Phi 10$ мм (см. рис. 3.26) и базальтовой сеткой под нижним сечением, с дисперсной базальтовой фиброй. Средние результаты испытаний на прогиб 6 балок на 28-й день периода выдерживания были использованны.

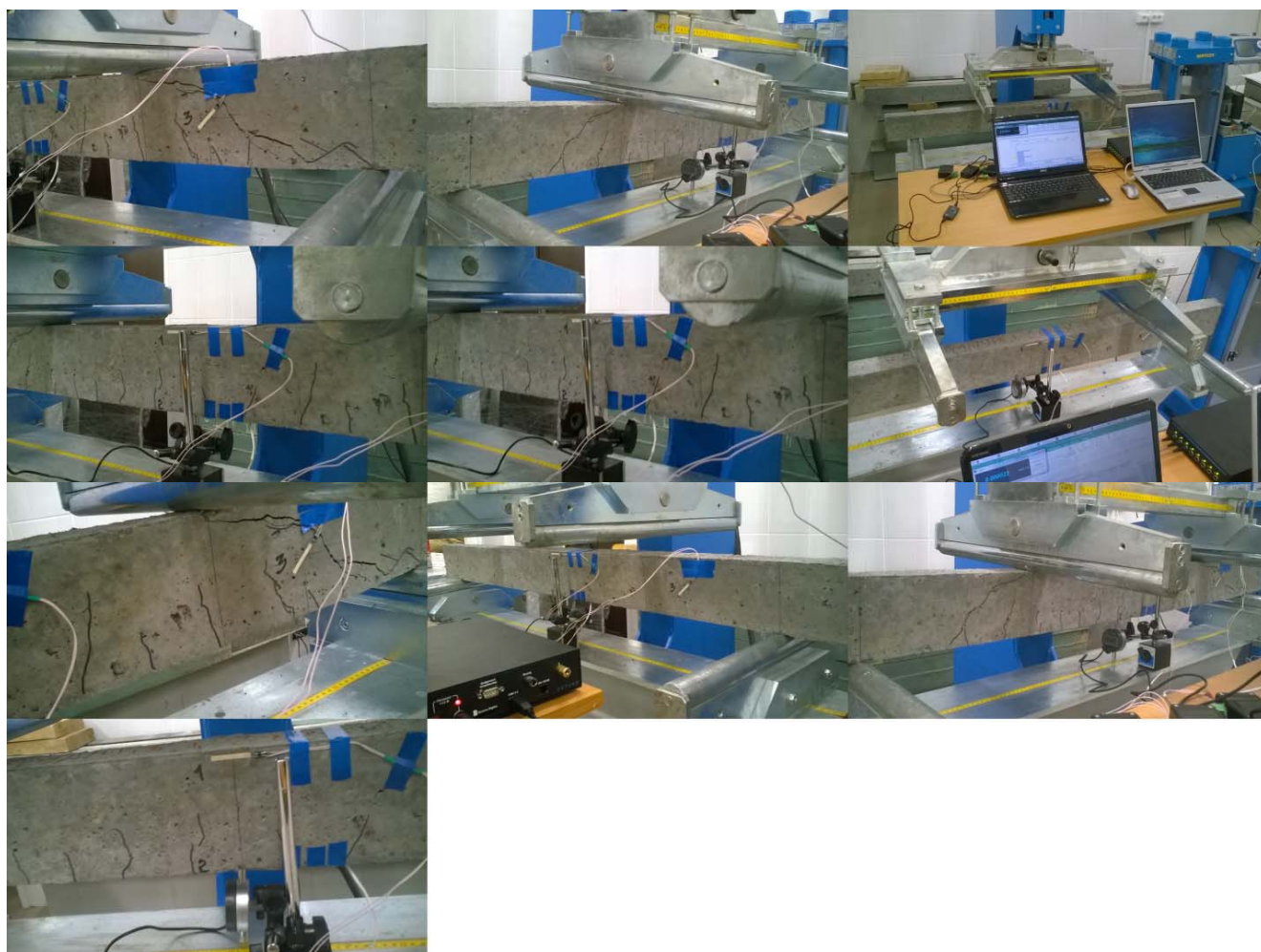


Рисунок 3.26 - Испытание на прогиб керамзитобетонной балки с базальтовой арматурой $2\varnothing 10$ мм, дисперсной базальтовой фиброй и базальтофибровым полимером (сеткой)

Сначала на балке были видны трещины от изгиба, затем трещина от сдвига + трещина от изгиба.

На рисунке 3.27 показана диаграмма нагрузки-прогиба керамзитобетонной балки. Видно, что керамзитобетонной балка, армированная дисперсным рубленым базальтовым волокном, базальтовой арматурой и стальной арматурой выдержала большую нагрузку, чем другие балки. В результатах экспериментов с балкой видно, что балка типа 1 имела прогиб 4.29149 мм при нагрузке 7.1 КН, в то время как балка типа 2 имела прогиб 2.88456 мм при нагрузке 4.2 КН. Далее в результатах испытания балка типа 3 при нагрузке 10.6 КН имела прогиб 5.58 мм, а при нагрузке 8.5 КН имела прогиб 9.093 мм.

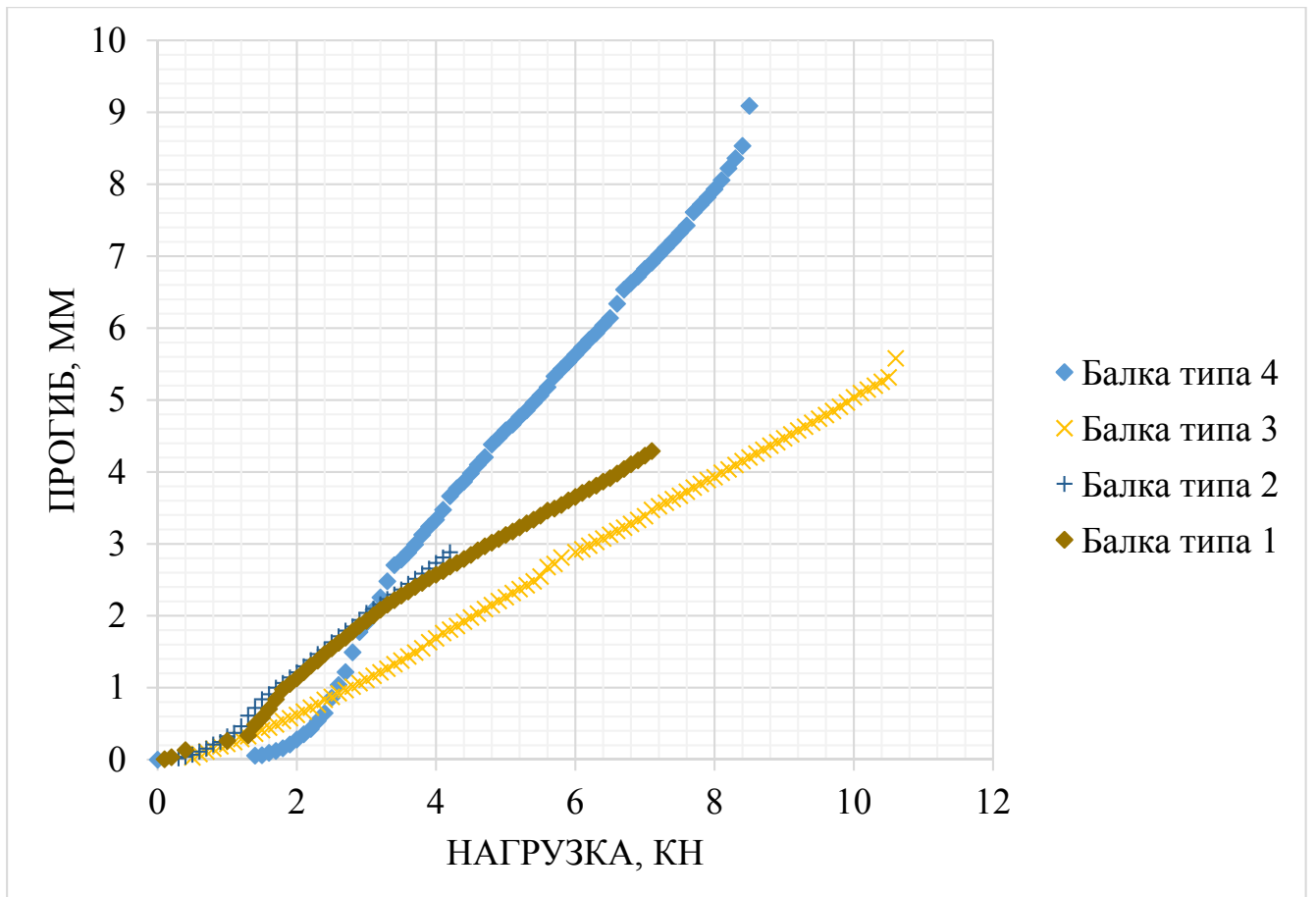


Рисунок 3.27 - Диаграмма нагрузки-прогиба обычного керамзитобетона и армированного фиброй

С рисунка 3.27 видно влияние базальтового волокна на дуктильность балки. Балка типа 4, содержащая базальтовую арматуру, дисперсное рубленое базальтовое волокно и базальтовую сетку показали больший прогиб со средней нагрузкой по сравнению с нагрузками 4-х типов балки. После снятия нагрузки с балки наблюдался характер пластичности, т.к. балка вернулась на 96% в исходное состояние с очень небольшими трещинами.

На рисунке 3.28 балка типа 3 соответствует оранжевая кривая на графиках датчиков 1, 2 и 3. На рисунке 3.28 для балки типа 2 датчик 1 продолжал считывание с 17:30:00 с деформацией 0,000007 до 17:57:14 с деформацией -0,000868, датчик 2 - с 17:30:00 с деформацией 0,000024 до 17:57:14 с деформацией 0,000052, а датчик 3 - с 17:30:00 с деформацией 0,000039 до 17:57:14 с деформацией 0,000383.

Испытание на деформацию началось в 17:30:00 и закончилось в 17:54:14. На рисунке 3.28 показан график времени-деформации балки типа 3.

На рисунке 3.28 балка типа 4 соответствует синяя кривая на графиках датчиков 1, 2 и 3. На рисунке 3.28 с балки типа 4 датчик 1 продолжал считывание с 17:30:00 с деформацией -0.000007 до 17:49:22 с деформацией -0.000982 , датчик 2 продолжал считывание с 17:30:00 с деформацией 0.000007 до 17:49:22 с деформацией 0.000059 , в то время как датчик 3 продолжал считывание с 17:30:00 с деформацией 0.000002 до 17:49:22 с деформацией 0.000096 . Испытание на деформацию началось в 17:30:00 и закончилось в 17:49:22.

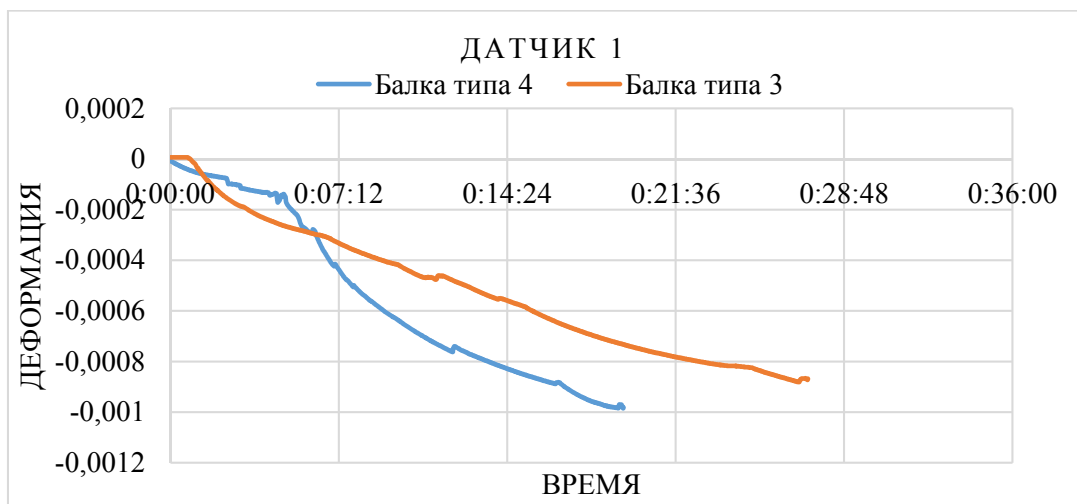
На рисунке 3.28 показан график времени-деформации балки типа 3 и балки типа 4. Проиллюстрированы графики времени-деформации по 3 (трем) датчикам, расположенным на балке типа 3 и балке типа 4.

На рисунке 3.28а видно, что датчик 1 на балке типа 3 выдержал дольше (27 минут 15 секунд) по сравнению с 19 минутами 22 секундами на балке типа 4.

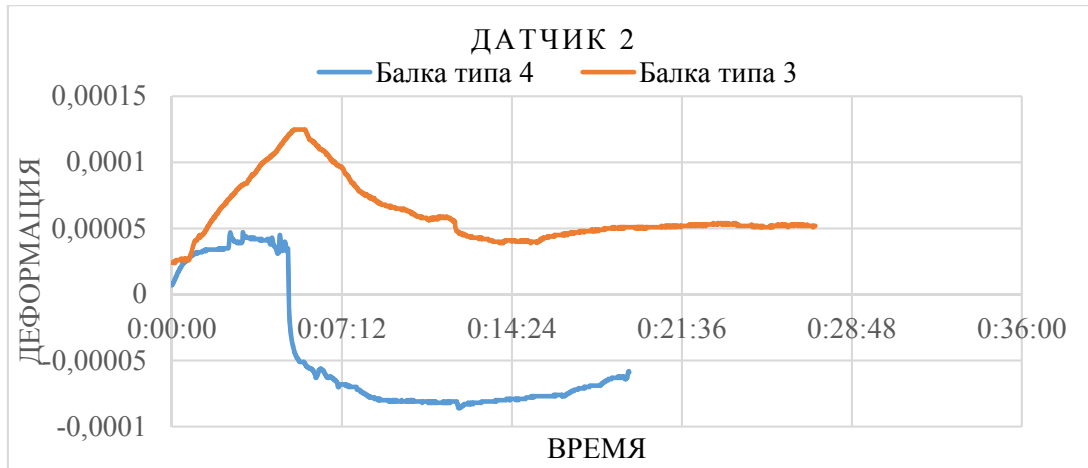
На рисунке 3.28б видно, что датчик 2 на балке типа 3 выдерживал дольше (27 минут 15 секунд) по сравнению с 19 минутами 22 секундами на балке типа 4.

На рисунке 3.28в видно, что датчик 3 на балке типа 3 выдержал дольше (27 минут 15 секунд) по сравнению с 19 минутами 22 секундами на балке типа 4.

а)



б)



в)

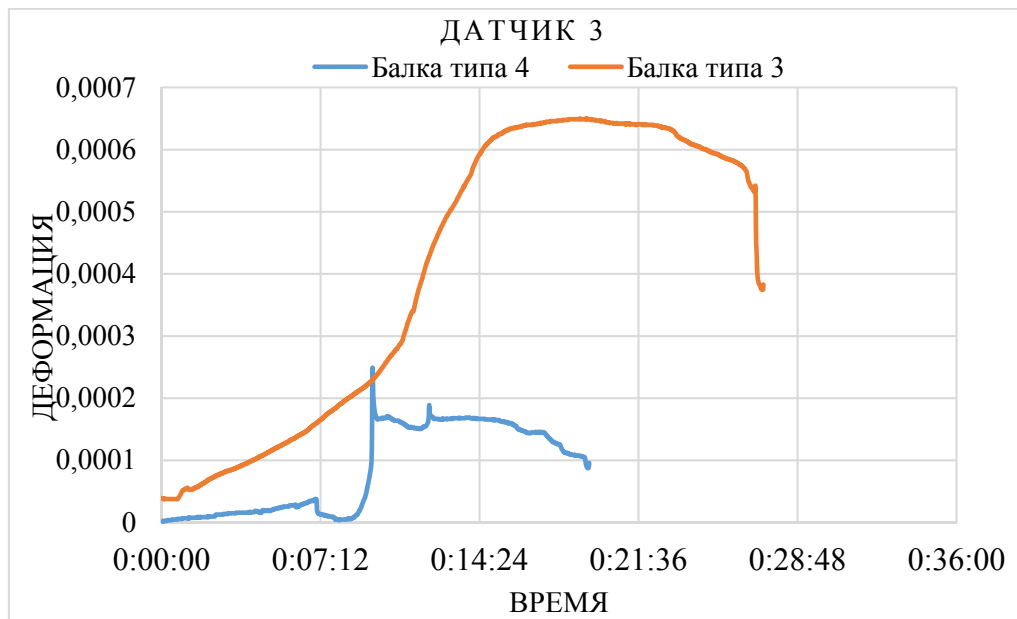


Рисунок 3.28 - Нагрузка-деформация балки типа 3 и 2: а) график времени-деформации по датчику 1 в балках типов 1 и 2; б) график времени-деформации по датчику 2 в балках типов 1 и 2; в) график времени-деформации по датчику 3 в балках типов 1 и 2.

Результаты и анализ керамзитобетонной плиты перекрытия

Были проведены эксперименты с четырьмя типами плит на предмет прогиба, деформации и трещин. Результаты испытаний на прогиб керамзитобетонных плит проиллюстрированы ниже.

Плита из облегченного керамзитобетона, длиной 1500 мм x Шириной 500 мм x Толщиной 65 мм, армированные базальтовым армирующим стержнем в поперечном сечении, 15Ø10mm и на продольном 5Ø10mm.

Плита 1-го типа - керамзитобетонная плита, усиленная базальтовой фиброй и базальтовой арматурой. В рамках проведения четырехточечного испытания на изгиб наверху плиты для определения зоны сжатия выбираются две симметричные точки нагружения (рисунок 3.29). Это приводит к образованию промежутка посередине между точками нагружения, с постоянным изгибающим моментом и высокой подверженностью силе сдвига. Когда приложенная статическая нагрузка была удалена, трещины в зоне натяжения плиты были отмечены так, как показано на рисунке 3.30.



Рисунок 3.29 - Прогиб под нагрузкой керамзитобетонной плиты с базальтовой фиброй и базальтовой арматурой (плита типа 1)

Плита обрушилась от зоны сдвига. Датчики измеряли деформацию на плите. Когда налагаемая нагрузка была снята с плиты, плита возвращалась в исходную форму с небольшим количеством заметных трещин.



Рисунок 3.30 - Образование трещин на керамзитобетонной плите с базальтовой фиброй и базальтовой арматурой (плита типа 1)

Плита 2-го типа - керамзитобетонная плита, усиленная базальтовой арматурой. Когда приложенная статическая нагрузка была удалена, трещины в

зоне натяжения плиты были отмечены так, как показано на рисунке 3.31. Сравнивая плиту 1 с плитой 2, видно, что плита 1 выдержала больше трещин, чем плита 2, причиной чего является включение дисперсного рубленого базальтового волокна в плиту 1, которой нет в плите 2.



Рисунок 3.31 - Плита типа 2 - керамзитобетонная плита с базальтовой арматурой (плита типа 2)

Плита 3-го типа - керамзитобетонная плита, усиленная базальтовой арматурой и базальтовой сеткой. В рамках проведения четырехточечного испытания на изгиб наверху плиты для определения зоны сжатия выбираются две симметричные точки нагружения, как показано на рисунке 3.32. Когда приложенная статическая нагрузка была удалена, трещины в зоне натяжения плиты были отмечены так, как показано на рисунке 3.33. Сравнивая плиту 3, плиту 2 и плиту 1, видно, что плита 1 выдержала больше трещин, чем плита 2, а плита 1 выдержала больше трещин, чем плита 3, причиной чего являются включение дисперсного рубленого базальтового волокна в плиту 1. А плита 3 выдержала больше трещин чем плитой 2 из за базальтовую сетку на нижней поверхности плиты 3, которых нет у плиты 2. В силу того, что достигнут предел нагрузки, в поперечном сечении среза плиты на рисунке 3.33 наблюдается заметная трещина.



Рисунок 3.32 - Прогиб под нагрузкой керамзитобетонной плиты с базальтовой арматурой и сеткой (плита типа 3)



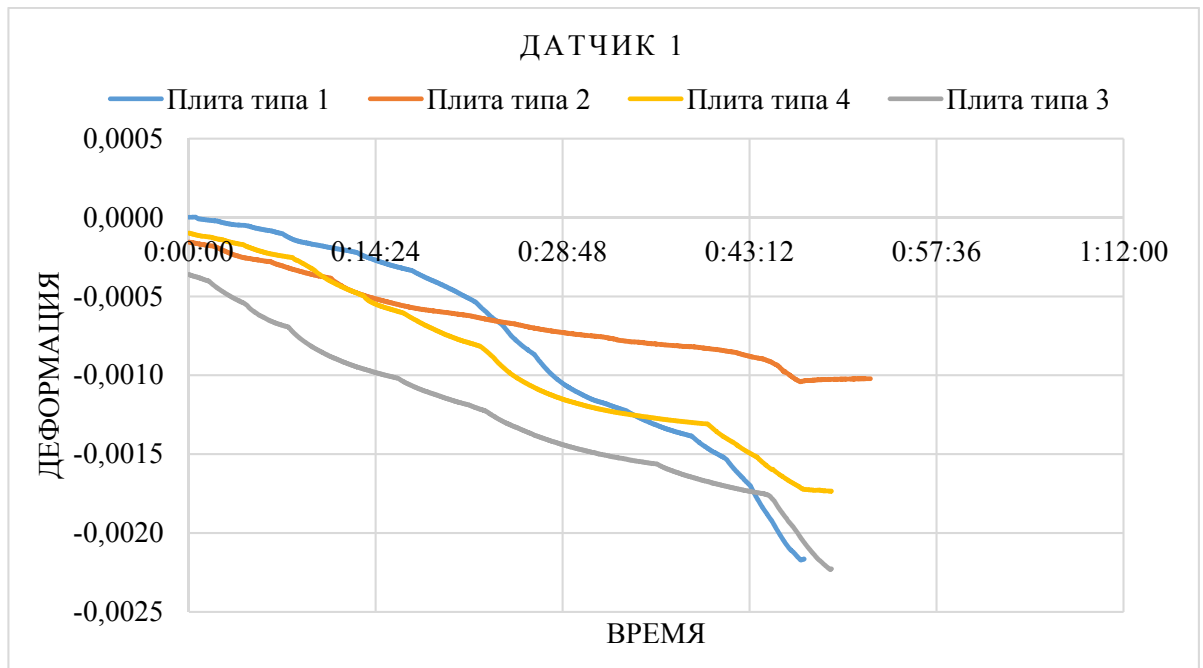
Рисунок 3.33 - Образование трещин в керамзитобетонной плите с базальтовой арматурой и сеткой (плита типа 3)

Плита 4-го типа - керамзитобетонная плита, усиленная базальтовой фиброй, базальтовой арматурой и базальтовой сеткой. Когда приложенная статическая нагрузка была удалена, трещины в зоне натяжения плиты были отмечены так, как показано на рисунке 3.34. Сравнивая плиту 4, плиту 3, плиту 2 и плиту 1, видно, что плита 1 выдержала больше трещин, чем плита 2, а плита 1 выдержала больше трещин, чем плита 3, а плита 4 выдержала больше трещин, чем плита 3, причиной чего является включение дисперсного дисперсного рубленого базальтоволокна и армирование нижней плиты 4 базальтовой сеткой.

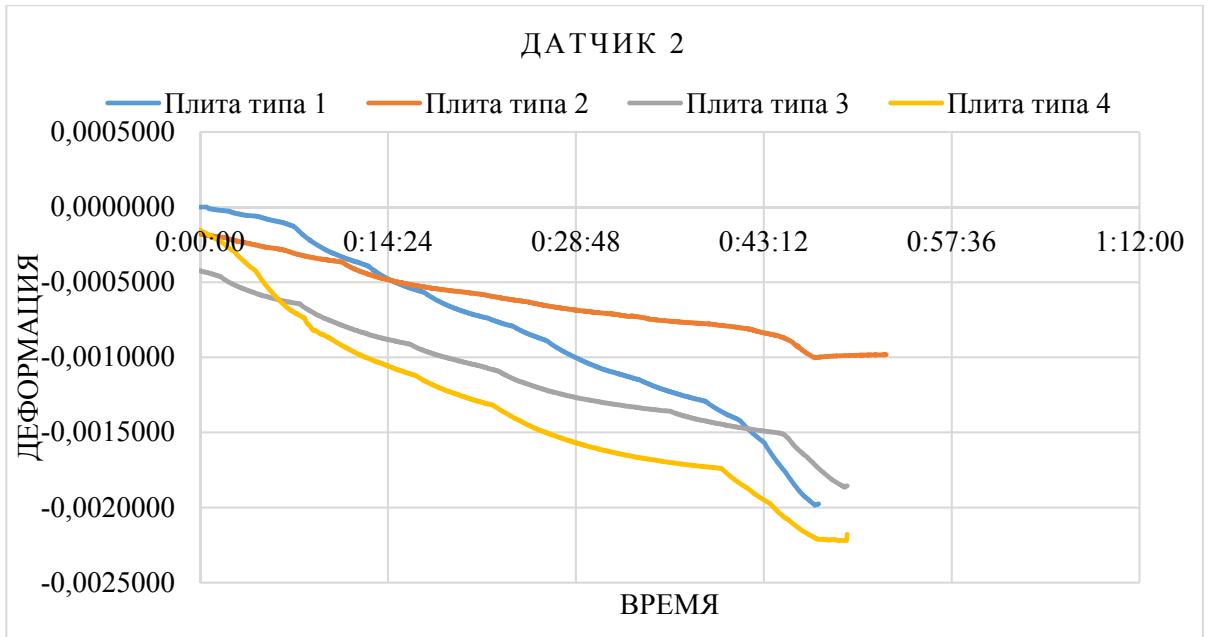


Рисунок 3.34 - Плита 4-го типа - керамзитобетонная плита с базальтовой фиброй, базальтовой арматурой и базальтовой сеткой (плита типа 4)

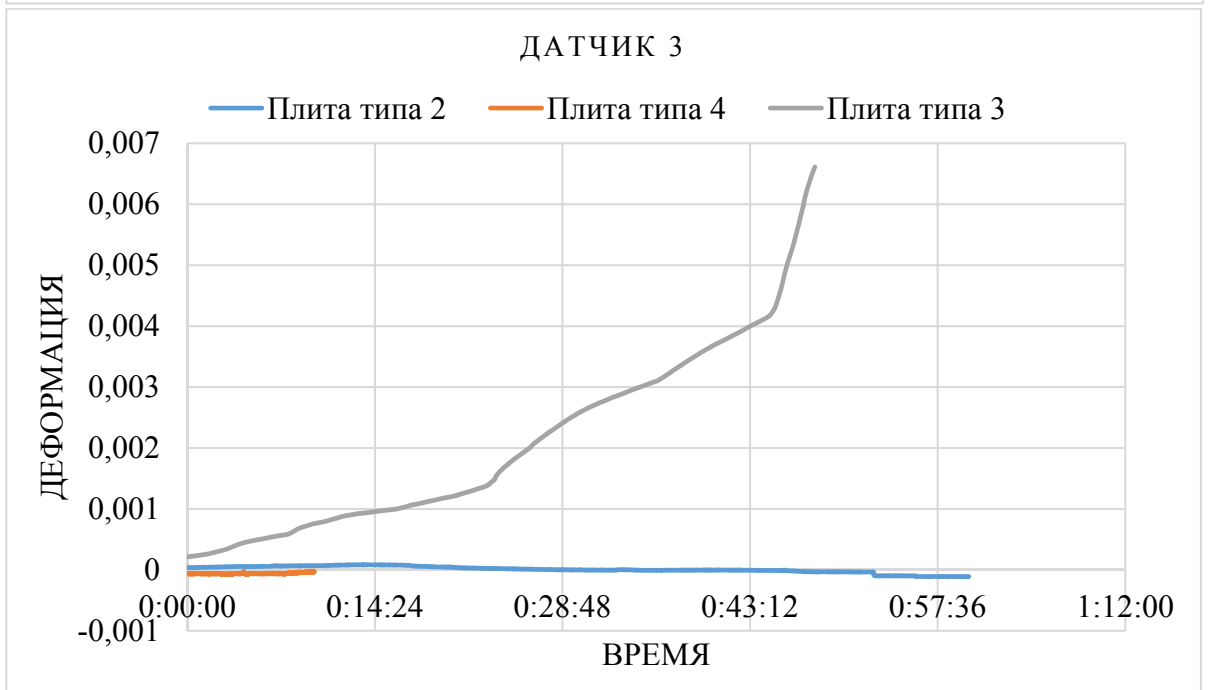
а)



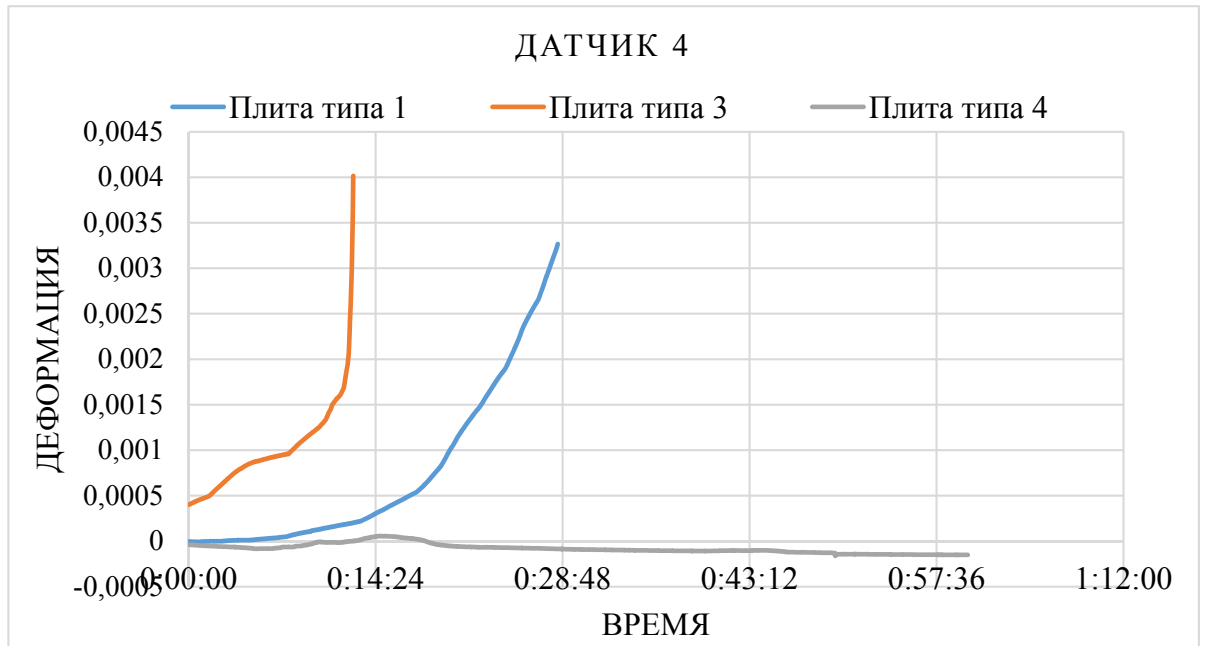
б)



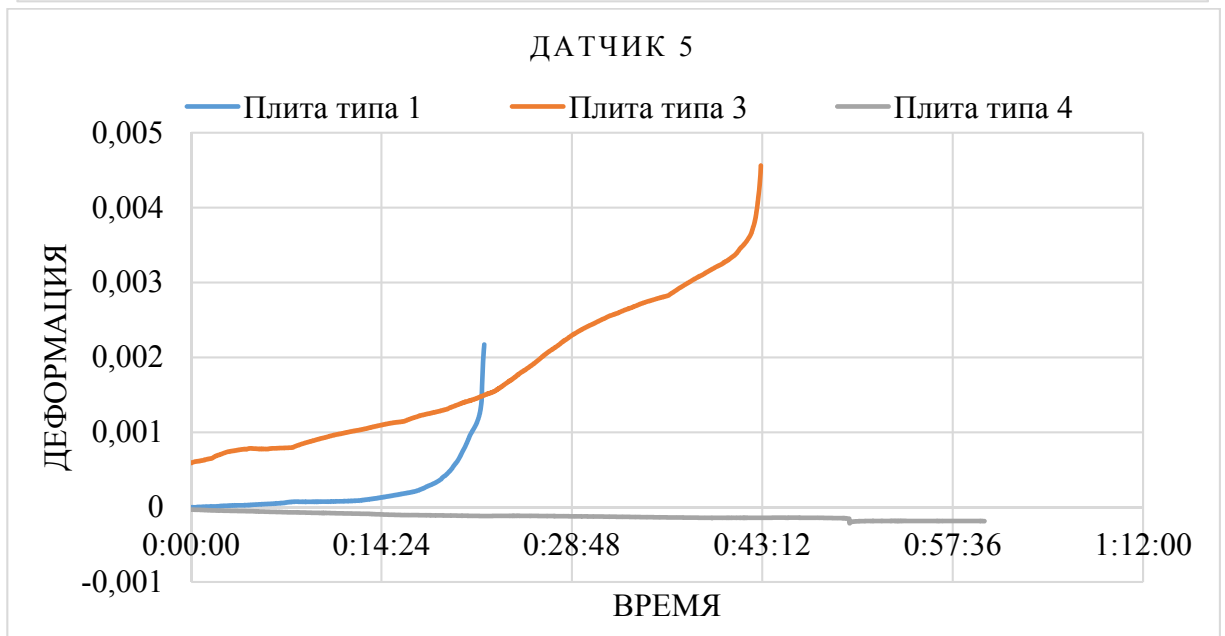
в)



г)



д)



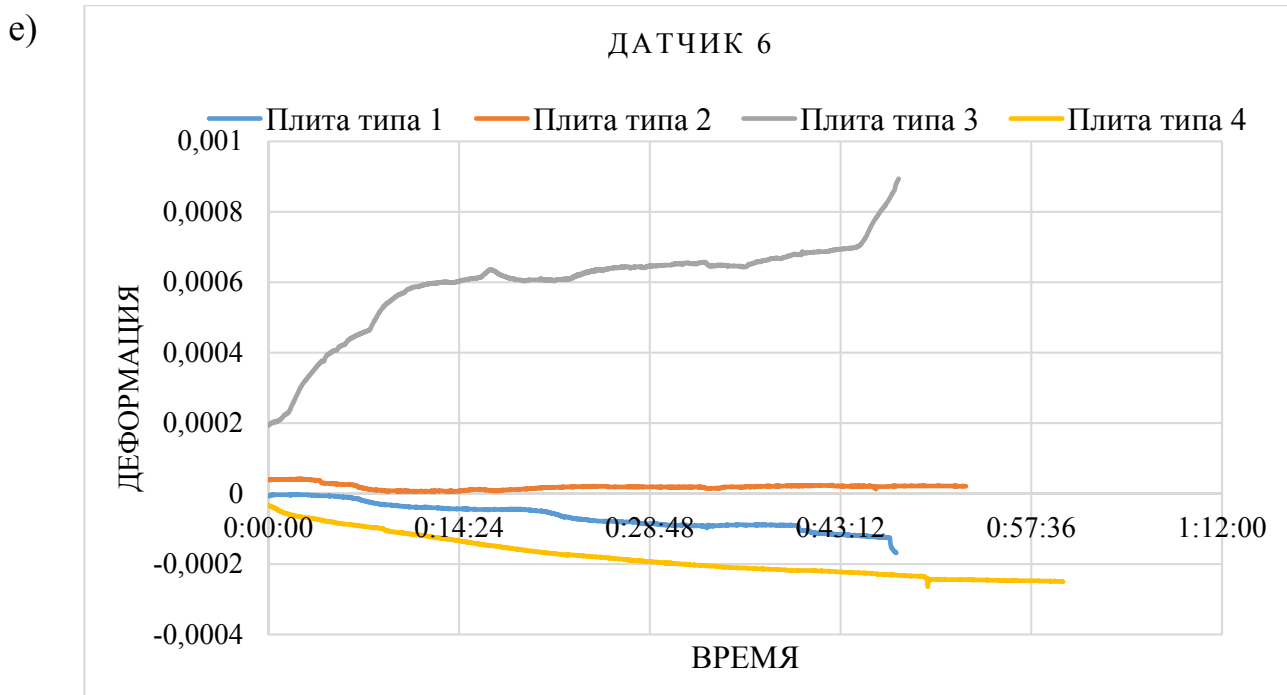


Рисунок 3.35 - Время-деформация керамзитобетонных плит: а) график времени-деформации по датчику 1 в 4 типах плит; б) график времени-деформации по датчику 2 в 4 типах плит; в) график времени-деформации по датчику 3 в 4 типах плит; г) график времени-деформации по датчику 4 в 4 типах плит; д) график времени-деформации по датчику 5 в 4 типах плит; е) график времени-деформации по датчику 6 в 4 типах плит.

На рисунке 3.35 показаны графики времени-деформации по 6 (шести) датчикам, расположенным на плитах типов 1, 2, 3 и 4.

На рисунке 3.35а видно, что у датчика 1 на плите типа 1 время работы (47 минут 24 секунды) с деформацией -0,002164, на плите типа 2 время работы (52 минуты 30 секунд) с деформацией -0,001021, на плите типа 3 время работы (49 минут 30 секунд) с деформацией -0,002226, на плите типа 4 время работы (49 минут 30 секунд) с деформацией -0,001734.

На рисунке 3.35б видно, что у датчика 2 на плите типа 1 время работы (47 минут 24 секунды) с деформацией -0,0019760, на плите типа 2 время работы (52 минуты 35 секунд) с деформацией -0,000982, на плите типа 3 время работы (49

минут 35 секунд) с деформацией $-0,001855$, на плите типа 4 время работы (49 минут 35 секунд) с деформацией $-0,002178$.

На рисунке 3.35в датчик 3 на плите типа 1 не был активен, на плите типа 2 время работы (59 минут 59 секунд) с деформацией $-0,000108$, на плите типа 3 время работы (48 минут 10 секунд) с деформацией $0,006613$, на плите типа 4 время работы (09 минут 45 секунд) с деформацией $-0,000031$.

На рисунке 3.35г видно, что у датчика 4; на плите типа 1 время работы (28 мин 25 сек) с деформацией $0,003266$, на плите типа 2 датчик 4 не был активен, на плите типа 3 время работы (12 мин 40 сек) с деформацией $0,004015$, на плите типа 4 время работы (1 час 00 мин 00 сек) с деформацией $-0,00015$.

На рисунке 3.35д видно, что у датчика 5; на плите типа 1 время работы (22 мин 10 секунд) с деформацией $0,002173$, на плите типа 2 датчик 5 не был активен, на плите типа 3 время работы (43 мин 05 секунд) с деформацией $0,004563$, на плите типа 4 время работы (1 час 00 мин 00 сек) с деформацией $-0,000185$.

На рисунке 3.35е видно, что у датчика 6 на плите типа 1 время работы (47 минут 24 секунды) с деформацией $-0,000168$, на плите типа 2 время работы (52 минуты 40 секунд) с деформацией $0,000021$, на плите типа 3 время работы (47 минут 35 секунд) с деформацией $0,000894$, на плите типа 4 время работы (1 час 00 минут 00 секунд) с деформацией $-0,00025$.

График нагрузки-прогиба все 4 тип плит показан в рисунке 3.36 где максимальная нагрузка $16,2$ кН, прогиб $8,075$ мм для плиты 1-го типа а для плиты 2-го типа имеет максимальной нагрузки 32 кН, прогиб $15,29$ мм. Далее на рисунке 3.37, плита 3-го типа имеет максимальной нагрузки $32,5$ кН, прогиб $19,15$ мм а для плиты 4-го типа имеет максимальной нагрузки $24,7$ кН, прогиб $17,26$ мм.

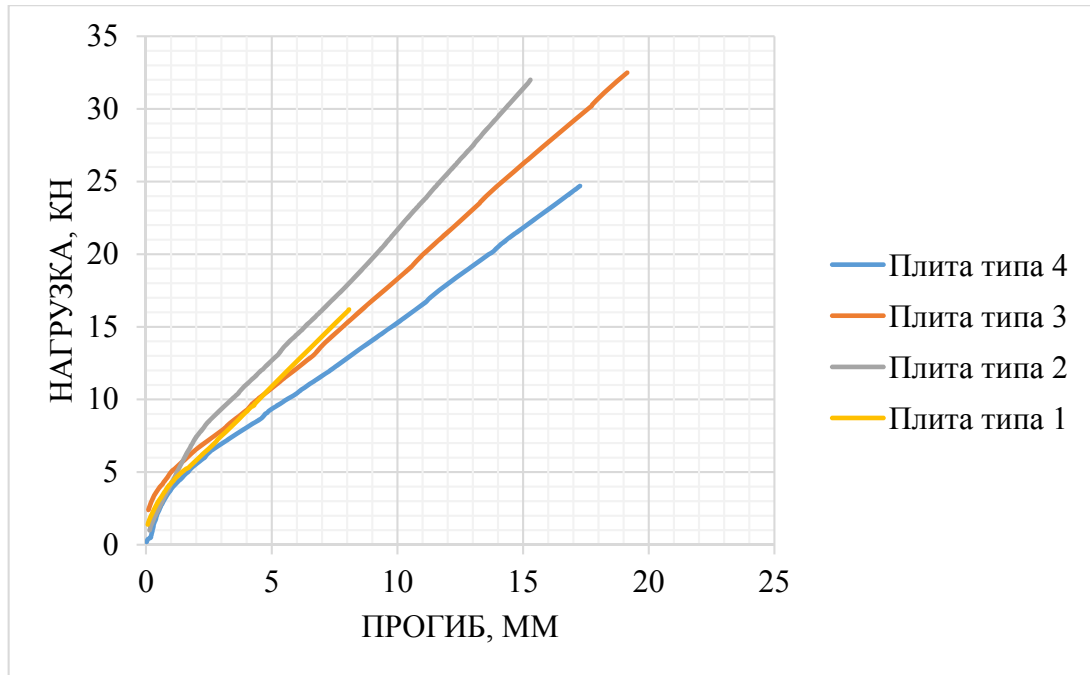


Рисунок 3.36 - Прогиб под нагрузкой 4 типов керамзитобетонных плит

3.2 Вывод по главе 3

Включение рубленного базальтового волокна и базальтовой сетки в керамзитобетонной конструктивных элементов повысило прочность и пластичность этих элементов. Снижение физических трещин наблюдается на плите и балках, когда они замыкаются в базальтовую сетку и в них закладываются диспергированные рубленые базальтовые волокна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследованы вопросы влияния базальтовой фибры в облегченном керамзитобетоне на прочность на сжатие, прочность на изгиб, прочность на растяжение при скалывании, трещиностойкость. Также было исследовано влияние базальтовой арматуры на прогиб и дуктильность керамзитобетона, армированного базальто-волокнистыми материалами. На основании исследований, проведенных в настоящей диссертации, сделаны следующие выводы:

1. БФ хорошо работает в керамзитобетоне, и ее высокое процентное содержание в керамзитобетоне дает более высокую прочность на сжатие и изгиб.
2. Предложенные аналитические модели позволяют определять допустимые нагрузки на конструкции при проведении строительных работ.
3. Использование рубленого базальтового волокна повышает прочность на растяжение при скалывании, не влияя на обрабатываемость бетона.
4. Увеличение доли БФ до 1,6% приводит к увеличению прочности на растяжение при скалывании керамзитобетона с 2,415 МПа до 5,258 МПа через 28 дней.
5. Предложенная аналитическая модель может быть использована для расчета прочности на растяжение при скалывании керамзитобетона в возрасте от 7 до 28 дней с высокой точностью. R^2 уравнения равен 95,73%.
6. Прочность на сжатие и прочность на изгиб зависят от процентного содержания базальтовой фибры.
7. Значение дисперсного рубленого базальтового волокна проявляется при образовании трещин в конструктивных керамзитобетонных элементах (колоннах, балках, плитах).
8. Базальтовая сетка допускает больший прогиб, но дает меньше трещин на балках и плитах при изгибе.
9. Замена базальтовой арматуры стальной подтверждает более высокую дуктильность при базальто-фибровом армировании.

10. Показатель пористости керамзитобетонных колонн выше у цилиндра типа 3 благодаря наличию и дисперсного рубленого базальтового волокна, и базальтовой сетки - по сравнению с цилиндром типа 2 с одним лишь дисперсным рубленым базальтовым волокном и цилиндром 1 из неармированного керамзитобетона.

Перспективы дальнейших исследований в развитие темы

Дальнейшее развитие исследований может быть направлено на совершенствование методов расчета прочности и трещиностойкости сжимаемых и изгибаемых керамзитобетонных элементов с различным поперечным сечением, параметров и типов дисперсно-фибрового и арматурного усиления, а также схем их применения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абдаллах, М.Т. Сопротивление изгибу преднапряженных керамзитовофибро-железобетонных элементов со смешанным армированием: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Абдаллах Мажед Тахер. - Воронеж, 1997. - 23 с.
2. Баженов, Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // I-ая Всероссийская конференция по проблемам бетона и железобетона «Бетон на рубеже третьего тысячелетия». - М.: Ассоциация «Железобетон», 2001. - С. 91-101.
3. Василовская, Н.Г. Цементные композиции, дисперсно-армированные базальтовой фиброй / Н.Г. Василовская, И.Г. Енджиевская, И.Г. Калугин // Вестник ТГАСУ. - 2011. - N 3. - С. 153-158.
4. Волков, И.В. Проблемы применения фибробетона в отечественном строительстве / И.В. Волков // Строительные материалы. - 2004. - N 6. - С. 13-15.
5. Волков, И.В. Фибробетон состояние и перспективы применения в строительных конструкциях / И.В. Волков // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. - 2004. - N 5. - С. 24-25.
6. Волкова, А.А. Структура и свойства текстильно-армированного бетона / А.А. Волкова, А.В. Пайков, О.Н. Столяров, С.Г. Семенов, Б.Е. Мельников // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – №7. – С.50–56.
7. Галишникова, В.В. Исследование влияния дисперсного армирования базальтовой фиброй на пластические свойства легких бетонов на керамзитовом гравии / В.В. Галишникова, П.Ч. Чиадигхикаоби, Д.А. Эмири // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2019. - Т. 15. - N 5. - С. 360-366.
8. Габрусенко, В.В. Об особенностях проектирования конструкций из бетона с композитной арматурой / В.В. Габрусенко // Стены и Фасады. - 2013. - N 2 (68). - С. 45-48.
9. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. - М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2018. - 31 с.

10. ГОСТ 23732-2011 Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. - М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2019. - 11 с.
11. ГОСТ 24026-80 Исследовательские испытания. Планирование эксперимента. Термины и определения. - М.: Издательство стандартов, 1991. - 18 с.
12. ГОСТ 31938-2012 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. - М.: ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ», 2014. - 34 с.
13. ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия. - М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2019. - 7 с.
14. Готовим пропорции разных видов бетона [Электронный ресурс] // сайт ремонтно-строительной компании «Строительный сектор». - Режим доступа: <http://sector.house/stati/stroitelstvo/materialy/beton/>.
15. Грановский, А.Ф. Перспективы применения арматурных сеток на основе базальтового волокна в строительстве / А.Ф. Грановский, В.В. Галишникова, Е.И. Берестенко // Промышленное и гражданское строительство. - 2015. N 3. - С. 59-63.
16. Джигирис, Д.Д. Основы производства базальтовых волокон и изделий: монография / Д.Д. Джигирис, М.Ф. Махова. - М.: Теплоэнергетик, 2002. - 411 с.
17. Долголаптев, В.М. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых бетонных элементов, армированных стеклянными стержнями: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.01 / Долголаптев Виктор Михайлович. - Киев, 1991. - 199 с.
18. Иноземцев, А.С. Сравнительный анализ влияния наномодифицирования и микродисперсного армирования на процесс и параметры разрушения высокопрочных легких бетонов / А.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Строительные материалы. - 2017. - N 7. - С. 11-15.
19. Карпесьо, И. Решение проблем коррозии с помощью базальтового волокна [Электронный ресурс] / И. Карпесьо // информационно-новостной портал Basalt Today. - Режим доступа: <http://basalt.today/2017/12/14074/>.

20. Кварцевая Мука Silverbond [Электронный ресурс] / сайт компании «ГеоСтиль». - Режим доступа: http://www.geogips.ru/catalog/mineralnye_napolniteli_i_zapolniteli/limestone-flour/kvartsevaya_muka/kvartc_muka50/.
21. Характеристики керамзита [Электронный ресурс] / сайт компании «Керамзитстрой». - Режим доступа: <https://keramzitik.ru/kharakteristiki-keramzita/>.
22. Ключев, А.В. Расчет процента армирования фибробетонных композитов / А.В. Ключев // Международный научно-исследовательский журнал. - 2015. - N 5 (36). - С. 74-77.
23. Ключев, С.В. Экспериментальные исследования фибробетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2011. - N 4. - С. 71-75.
24. Лапшинов, А.Е. К влиянию поперечного армирования на прочность и деформативность сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой / А.Е. Лапшинов, А.Г. Тамразян // Строительство и реконструкция. - 2018. - N 4 (78). - С. 20-30.
25. Лесовик, В.С. Текстиль-бетон - эффективный армированный композит будущего / В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов, Е.С. Глаголев // Строительные материалы. - 2017. - N 3. - С. 81-84.
26. Лещинский, М.Ю. Испытание прочности бетона: монография / М.Ю. Лещинский, Б.Г. Скрамтаев. - М.: Стройиздат, 1973. - 272 с.
27. Микрокремнезём [Электронный ресурс] / сайт компании «ГеоСтиль». - Режим доступа: http://www.geogips.ru/catalog/cement_i_dobavki/plasticizer-accelerator/mikrokremnezem/
28. Модификаторы бетона МБ-С [Электронный ресурс] // сайт компании «Предприятие Мастер Бетон». - Режим доступа: <http://www.masterbeton-mb.ru/products/modifikatory-betona-mb-s/>.

29. Окольников, Г.Э. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве / Г.Э. Окольников, С.В. Герасимов // Экология и строительство. - 2015. - N 3. - С. 14-21.
30. Окольников, Г.Э. Перспективы развития железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов / Г.Э. Окольников, Р.А. Хамракулов, Ю.В. Суслов // Системные технологии. - 2016. - N 1 (18). - С. 7-17.
31. Окольников, Г.Э. Применение базальтовой и углеродной сетки при реконструкции зданий и сооружений / Г.Э. Окольников, Г.И. Тихонов, Д.А. Бронников, И.С. Васильев // Системные технологии. - 2019. -N 2. - С. 14-18.
32. Оснос, С.П. Армирующие и композитные материалы на основе БНВ в дорожном строительстве / С.П. Оснос, Е.В. Краюшкина, Т.Ю. Химерик // Композитный мир. - 2017. - N5. - С. 52-64.
33. Перфилов, В.А. Влияние базальтовых волокон на прочность мелкозернистых фибробетонов / В.А. Перфилов, М.О. Зубова // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Серия: Политематическая. - 2015. - N 1 (37). - С. 1-4.
34. Попов, Д.Ю. Состояние и перспективы применения текстиль-бетона / Д.Ю. Попов // Промышленное и гражданское строительство. - 2018. - N 3. - С. 51-57.
35. Пухаренко, Ю.В. Физико-механическое моделирование процессов деформирования и разрушения цементного композита, армированного синтетической макрофиброй / Ю.В. Пухаренко, М.П. Кострикин // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019). Тезисы докладов международной научной конференции. - 2019. - С. 37-38.
36. Рабинович, Ф.Н. Дисперсно-армированные бетоны / Ф.Н. Рабинович. - М.: Стройиздат, 1989. - 250 с.
37. Сарайкина, К.А. Долговечность автоклавного газобетона, армированного базальтовой фиброй / К.А. Сарайкина, А.Д. Курзанов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. - 2012. - N 4. - С. 103-109.

38. Семенов, В.С. Свойства облегченных строительных растворов с дисперсным армированием / В.С. Семенов, Т.А. Розовская, А.Ю. Губский, Р.Р. Губская // Промышленное и гражданское строительство. - 2016. - N 10. - С. 120-124.
39. Столяров, О.Н. Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве / О.Н. Столяров, А.С. Горшков // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – №4. – С.21–25.
40. Харун, М. Физико-механические свойства базальто-волокнутого высокопрочного бетона / М. Харун, Д.Д. Коротеев, П. Дхар, С. Ждеро, Ш.М. Елроба // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2018. - Т. 14. - N 5. - С. 396-403.
41. Что такое кварцевый песок: состав, характеристики, свойства, вес и плотность [Электронный ресурс] // сайт компании «Юником». - Режим доступа: <http://www.kvarc-pesok.ru/informatsiya/chto-takoe-kvartsevyy-pesok-sostav-kharakteristiki-svoystva-ves-i-plotnost/>.
42. Шляхтина, Т.Ф. Особенности подбора составов дисперсноармированных бетонов / Т.Ф. Шляхтина. - Ленинград: ЛенЗНИИЭП, 1982. - 91с.
43. SikaPlast Concrete [Электронный ресурс] // сайт международного концерна Sika. - Режим доступа: <https://sikahome.ru/catalog/dobavki-v-beton/sikaplast-concrete/>.
44. Abalı, Yü. Using phosphogypsume and boron concentrator wastes in light brick production / Yü. Abalı, M. A. Yurdusev, M.S. Zeybek, A.A. Kumanlıoğlu // Construction and Building Materials. - 2007. - N 21 (1). - Pp. 52-56.
45. Abdelhamid, C. Ductility of reinforced lightweight concrete beams and columns / C. Abdelhamid, M.S. Jamal, D. Saleh // Latin American Journal of Solids and Structures. - 2014. - N 11 (7). - Pp. 1251-1274.
46. Abdulhadi, M. A comparative study of basalt and polypropylene fibers reinforced concrete on compressive and tensile behavior / M. Abdulhadi // International Journal of Engineering Trends and Technology. - 2014. - Vol. 300. - Pp. 2231-5381.

47. ABNT. NBR 9779:1987 Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção da água por capilaridade - Método de ensaio. - Associação Brasileira de Normas Técnicas. - Rio de Janeiro, 1987.
48. ACI 213R-87 Guide for structural lightweight aggregate concrete. - Detroit, Michigan: American Concrete Institute, 1987.
49. ACI 440.1R-15 Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars. ACI committee 440. - Farmington Hills: American Concrete Institute, 2015.
50. ACI Committee 544, 544.1R-96 Report on Fiber Reinforced Concrete (Reapproved 2009). Technical Documents. - 1996.
51. Adejuyigbe, I.B. Sustainability comparison for steel and basalt fiber reinforcement, landfills, leachate reservoirs and multi-functional structure / I.B. Adejuyigbe, P.C. Chiadighikaobi, D.A. Okpara // Civil Engineering Journal. - 2019. - Vol. 5. - N 1. - Pp. 172-180.
52. Ahmad, S.H. Shear ductility of reinforced lightweight concrete beams of normal strength and high strength concrete / S.H. Ahmad, Y. Xie, T. Yu // Cement and Concrete Composites. - 1995. - N 17 (2). - Pp. 147-159.
53. Akçaözoğlu, K. The effect of elevated temperature on the lightweight concrete produced by expanded clay aggregate and calcium aluminate cement / K. Akçaözoğlu, S. Akçaözoğlu // Bilge International Journal of Science and Technology Research. - 2017. - N 1. - Pp. 59-70.
54. Akinwumi, I.I. Structural evaluation of lightweight concrete produced using waste newspaper and office paper / I.I. Akinwumi, O.M. Olatunbosun, O.M. Olofinnade, P.O. Awoyera // Civil and Environmental Research. - 2014. -Vol. 6. - N 7. - Pp. 160-168.
55. Alexander, M.G. Engineering and transport properties of the interfacial transition zone in cementitious composites / M.G. Alexander, G. Arliguie, G. Ballivy, A. Bentur, J. Marchand. - RILEM Publications, 1999. - 404 p.
56. Al-Sodi, J.H. Strength of lightweight concrete: student work report / J.H. Al-Sodi. - Arab International University, 2015.

57. Amadeo, K. Haiti earthquake facts, its damage, and effects on the economy / K. Amadeo // The Balance. - Available at: <https://www.thebalance.com/haiti-earthquake-facts-damage-effects-on-economy-3305660>.
58. Ampofo-Anti, N. Environmental impacts of construction materials use: a life cycle perspective / N. Ampofo-Anti // Green building handbook. - South Africa. - 2009. - Vol. 1: (A guide to ecological design). - Pp. 1-9.
59. Apostolopoulos, Ch.A. Effect of corrosion on mass loss, and high and low cycle fatigue of reinforcing steel / Ch.A. Apostolopoulos, D. Michalopoulos // Journal of Materials Engineering and Performance. - 2006. - N 15 (6). - Pp. 742-749.
60. Archbold, P. Evaluation of corrosion-resistant basalt-fiber-reinforced polymer bars and carbon-fiber-reinforced polymer grid reinforcement to replace steel in precast concrete underground utility vaults. Precast / P. Archbold, G. Tharmarajah // Prestressed Concrete Institute Journal. - 2016. - N 61 (5). - Pp. 69-76.
61. Arisoy, B. Material characteristics of lightweight, high-performance concrete reinforced with PVA / B. Arisoy, H.C. Wu // Construction and Building Materials. - 2008. - N 22 (4), - Pp. 635-645.
62. Arivalagan, S. Study on the compressive and split tensile strength properties of basalt fibre concrete members / S. Arivalagan // Global Journal of Researches in Engineering Civil And Structural Engineering. - 2012. - Vol. 12. - Issue 4. - Pp. 23-27.
63. Arslan, M.E. Effects of basalt and glass chopped fibers addition on fracture energy and mechanical properties of ordinary concrete: CMOD Measurement / M.E. Arslan // Construction and Building Materials. - 2016. - N 114. - Pp. 383-391.
64. ASTM C1585-13 Standard test method for measurement of rate of absorption of water by hydraulic-cement concretes. - ASTM International, West Conshohocken, PA, 2013. - Available at: www.astm.org.
65. ASTM C496 Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. - ASTM International, West Conshohocken, 2004.

66. Balendran, R.V. Influence of steel fibres on strength and ductility of normal and lightweight high strength concrete / R.V. Balendran, F.P. Zhou, A. Nadeem, A.Y.T. Leung // *Building and Environment*. - 2002. - Vol. 37. - Issue 12. - Pp. 1361-1367.
67. Benmokrane, B. Designing and testing of concrete bridge decks reinforced with glass FRP bars / B. Benmokrane, E. El-Salakawy, A. El-Ragaby, T. Lackey // *Journal of Bridge Engineering*. - 2006. - N 11 (2). - Pp. 217-229.
68. Benmokrane, B. Performance evaluation of innovative concrete bridge deck slabs reinforced with fibre-reinforced-polymer bars / B. Benmokrane, E. El-Salakawy, A. El-Ragaby, S. El-Gamal // *Canadian Journal of Civil Engineering*. - 2011. - N 34 (3). - Pp. 298-310.
69. Bodnárová, L. Behaviour of lightweight expanded clay aggregate concrete exposed to high temperatures / L. Bodnárová, R. Hela, M. Hubertová, I. Nováková // *International Journal of Civil and Environmental Engineering*. - 2014. - Vol. 8. - N. 12. - Pp. 1210-1213.
70. Bogas, J.A. Compressive strength evaluation of structural lightweight concrete by non-destructive ultrasonic pulse velocity method / J.A. Bogas, M.G. Gomes, A. Gomes // *Ultrasonics*. - 2013. - N 53 (5). - Pp. 962-972.
71. British standard method of testing hardened concrete for other than strength. - London: British Standard Institute, 1970. - BS 1881: Part 5.
72. Broadbent, C. World Steel: Providing the basis for LCA studies / C. Broadbent. - Brussels: World Steel Association, 2011.
73. Carrasquillo, R.L. Microcracking and engineering properties of high strength concrete: Ph.D. thesis / R.L. Carrasquillo. - Ithaca: Cornell University, 1980.
74. Ceroni, F. Durability issues of FRP rebars in reinforced concrete members / F. Ceroni, E. Cosenza, M. Gaetano, M. Pecce // *Cement and Concrete Composites*. - 2006. - Vol. 28. - Issue 10. - Pp. 857-868.
75. Chaohua, J. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fiber reinforced concrete / J. Chaohua, F. Ke, W. Fei, Ch. Da // *Materials & Design*. - 2014. Vol. 58. - Pp. 187-193.

76. Chiadighikaobi, P.C. Assessment of compression strength of concrete columns confined with basalt fibre reinforced polymer / P.C. Chiadighikaobi // 2nd International Conference on Building Materials and Materials Engineering. - 2019. - Vol. 278. - Article N 03001. - Pp. 1-5.
77. Chiadighikaobi, P.C. Design of a sustainable steel frame building using basalt materials for increased structural sustainability / P.C. Chiadighikaobi, I.B. Adejuyigbe. - 2018. - N 4 (52). - C. 71-78.
78. Chin, S.C. CFRP Composites for strengthening RC beams with large square opening at shear: fem & experimental / S.C. Chin, N. Shafiq, M.F. Nuruddin // 7th International Conference on Steel & Aluminium Structures. - Kuching, Sarawak, Malaysia. - 2011.
79. Çobanoğlu I. Core size and time effects on water absorption values of rock and cement mortar samples / I. Çobanoğlu, S.B. Çelik, I. Dinçer, D. Alkaya // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. - 2009. - Vol. 68. - Issue 4. - Article N 483.
80. Demers, M. Confinement of reinforced concrete columns with fibre-reinforced composite sheets-an experimental study / M. Demers, K.W. Neale // Canadian Journal of Civil Engineering. - 1999. - Vol. 26. - N 2. - Pp. 226-241.
81. Elshekh, A.E.A. Evaluation the effectiveness of chopped basalt fiber on the properties of high strength concrete / A.E.A. Elshekh, N. Shafiq, M.F. Nuruddin, A. Fathi // Journal of Applied Sciences. - 2014. - N 14. - Pp. 1073-1077.
82. Falade, F. Behaviour of lightweight concrete containing periwinkle shells at elevated temperature / F. Falade, E.E. Ikponmwosa, N.I. Ojediran // Journal of Engineering Science and Technology. - 2010. - Vol. 5. - N 4. - Pp. 379-390.
83. Faust, T. Properties of different matrixes and LWAs and their influences on the behaviour of structural LWAC / T. Faust // Proceedings Second International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. - Kristiansand, Norway, 2000. - Pp. 502-511.
84. FIP manual of Lightweight aggregate concrete / Fédération internationale de la précontrainte. - Surrey University Press, 1983. - Vol. 2. - 259 p.

85. Galishnikova, V.V. Basalt fiber reinforced expanded clay concrete for building structures / V.V. Galishnikova, M. Kharun, D.D. Koroteev, P.C. Chiadighikaobi // Magazine of Civil Engineering. - 2021. - N 101 (1). - Article N 10107.
86. Galishnikova, V.V. Contribution to refined basalt in modern Nigerian civil and structural engineering / V.V. Galishnikova, P.C. Chiadighikaobi // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences. - 2019. - Special Issue-1. - Pp. 557-567.
87. Hall, M.R. Materials for energy efficiency and thermal comfort in buildings / M.R. Hall. - Woodhead Publishing Series in Energy, 2010. - 760 p.
88. Hamadallah, A.-B. Comparison between Composite Column Using Limestone and Basalt Concrete / A.-B. Hamadallah, A. Benedetti // Open Journal of Civil Engineering. - 2013. - N 03 (01). - Pp. 1-6.
89. Hannawi, K. Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behaviour of UHPC / K. Hannawi, H. Bian, W.P. Agbodjan, B. Raghavan // Composite Part B. - 2016. - N 86. - Pp. 214-220.
90. Hanson, J.A. Replacement of lightweight aggregate fines with natural sand in structural concrete / J.A. Hanson // Journal American Concrete Institute Proceeding. -1964. - Vol. 61. - Issue 7. - Pp. 779-794.
91. High, C. Use of basalt fibers for concrete structures / C. High, H.M. Seliem, A. El-Safty, S.H. Rizkalla // Construction and Building Materials. - 2015. - N 96. - Pp. 37-46.
92. Holm, T.A. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments, Us Army corps of engineers / T.A. Holm, T.V. Bremner. - Prepared for U.S. Army Corps of Engineers; monitored by Structures Laboratory, U.S. Army Engineer Research and Development Center. - 116 p.
93. Hong, Zh.C. Mechanical properties of lightweight aggregate concrete - Effect of lightweight aggregates on concrete: PhD thesis / Hong Zhi C. - Hong Kong University, 2007. - 270 p.

94. Hu, X.Q. Basalt continuous fiber and its reinforcing composite material / X.Q. Hu, Y.F. Luo, T.N. Shen // *Hi-Tech Fiber and Application*. - 2002. - Vol. 27. - N 2. - Pp. 1-11.
95. Improving the Environmental Performance of Concrete // the website of Transitions Polishing & Grinding. - Available at: <http://transitionspg.com.au/30-blog/32-blog/product-news/112-improving-the-environmental-performance-of-concrete>
96. Iyer, P. Mechanical properties of fiber-reinforced concrete made with basalt filament fibers / P. Iyer, S. Kenno, S. Das // *Journal of Materials in Civil Engineering*. - 2015. -N 27 (11). - Pp. 04015015.
97. Jiang, Ch. Experimental study on the mechanical properties and microstructure of chopped basalt fiber reinforced concrete / Ch. Jiang, K. Fan, F. Wu, D. Chen // *Materials & Design*. - 2014. - Vol. 58. - Pp. 187-193.
98. Karaca, Z. Water absorption and dehydration of natural stones versus time / Z. Karaca // *Construction and Building Materials*. - 2010. - Vol. 24. - Issue 5. - Pp. 786-790.
99. Kharun, M. Effect of basalt fibres on the parameters of fracture mechanics of MB modifier based high-strength concrete / M. Kharun, D. Koroteev // VI International Scientific Conference “Integration, Partnership and Innovation in Construction Science and Education”. - 2018. - Vol. 251. - Article N 02003.
100. Kizilkanat, A.B. Mechanical properties and fracture behaviour of basalt and glass FRC: experimental study / A.B. Kizilkanat, N. Kabay, V. Akyuncu, S. Choudhury, A.H. Akea // *Construction and Building Materials*. - 2015. - N 100. - Pp. 218-224.
101. Kluge, R.H. Lightweight aggregate concrete / R.H. Kluge, M.M. Sparks // *Journal American Concrete Institute Proceeding*. - 1949. Vol. 45. - Pp. 625-649.
102. Koch, G. Corrosion costs and preventative strategies in the Unites States / G. Koch, M. Brongers, N. Thomson, Y. Virmani, J. Payer. - USA, 2002. - 773 p.
103. Koh, C.G. A plastic damage model for lightweight concrete and normal weight concrete / C.G. Koh, M.Q. Teng, T.H. Wee // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. - 2008. - N 2 (2). - Pp. 123-136.

104. Kvande, T. Investigations of some material properties for structural analysis of LECA masonry / T. Kvande. - Norwegian University of Science and Technology, 2001.
105. LECA // the website of LECA. - Available at: <https://www.leca.co.uk/drainage-properties-of-lecar-lwa/>.
106. Lee, J.J. Chemical stability of basalt fiber in alkaline solution / J.J. Lee, J. Song, H. Kim // *Fibers and Polymers*. - 2014. - N 15 (11). - Pp. 2329-2334.
107. Li, H. Abrasion resistance of concrete containing nanoparticles for pavement / H. Li, M.H. Zhang, J.P. Ou // *Wear*. - 2006. - N 260 (11-12). - Pp. 1262-1266.
108. Li, J.-J. Study on mechanical properties of basalt fiber reinforced concrete / J.-J. Li, Zh. Zhao // *5th International Conference on Environment, Materials, Chemistry and Power Electronics*. - 2016.
109. Li, W. Effects of nanoparticle on the dynamic behaviors of recycled aggregate concrete under impact loading / W. Li, Z. Luo, Ch. Long, Ch. Wu, W.H. Duan, S.P. Shah // *Materials & Design*. - 2016. - Vol. 112. - Pp. 58-66.
110. Li, W. Mechanical properties of basalt fiber reinforced geopolymeric concrete under impact loading / W. Li, J. Xu // *Materials Science and Engineering: A*. - 2009. - Vol. 505. - Issues 1-2. - Pp. 178-186.
111. Li-Guang, X. Experimental study on the effect of short basalt fiber on the properties of lightweight aggregate concrete / X. Li-Guang, L. Ji-Heng, L. Qing-Shun // *2nd International Conference on Architectural, Civil and Hydraulics Engineering*. - 2016. - Pp. 183-187.
112. Lipatov, Y.V. High alkali resistant basalt fibers for reinforcing concrete / Y.V. Lipatov, S.I. Gutrikov, M.S. Manylov, E.S. Zhukovskaya, B.I. Lazoryak // *Materials and Design*. - 2015. - N 73. - Pp. 60-66.
113. Lisakovsky, A.N. Yarns of basalt continuous fibers / A.N. Lisakovsky, Y.L. Tsybula, A.A. Medvedyev // *The Fiber Society. - New Frontiers in Fiber Science, Spring Conference*. - 2001.

114. Magnitude 5.8 quake hits off Japan's Fukushima, no damage or tsunami // The Straits Times. - Available at: <https://www.straitstimes.com/asia/east-asia/magnitude-58-quake-hits-on-japans-honshu>.
115. Martinez, S. Short term mechanical properties of high-strength lightweight cement mortar. Research report, Department of Structural Engineering / S. Martinez, A.H. Nilson, F.O. Slate. - Ithaca: Cornell University, 1982. - Pp. 98-109.
116. Matthys, S. Axial load behavior of large-scale columns confined with fiber-reinforced polymer composites / S. Matthys, H. Toutanji, K. Audenaert, L. Taerwe // Aci Structural Journal. - 2005. - Vol. 102. - N 2. - Pp. 258-267.
117. Mehta, P.K. Concrete: Microstructure, Properties and Materials / P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro. - . California, U.S.A: McGraw Hill Ltd, 2006.
118. Monjusha, S. Effect of chopped basalt fibers on the cyclic behavior of RCC beam-column subassemblies / S. Monjusha, R. Biswajit, A.M. Ruhul, I.L. Aminul // Arabian Journal for Science and Engineering. - 2018. - N 43 (4). - Pp. 1865-1874.
119. Monni, F. Basalt ropes: a new product for the rehabilitation of historical masonry / F. Monni, E. Quagliarini, S. Lenci // Proceedings of the International Conference of Preservation, Maintenance and Rehabilitation of Historical Buildings and Structures. - Tomar, Portugal. - 2014. - Vol. 2. - Pp. 1089-1097.
120. Muyasser, M.J. Flexural behavior of lightweight concrete beams / M.J. Muyasser, H.A. Daham, M.R. Saad // European Journal of Scientific Research. - 2011. - N 58 (4). - Pp. 582-592.
121. Nanni, A. FRP jacketed concrete under uniaxial compression / A. Nanni, N.M. Bradford // Construction and Building Materials. - 1995. - Vol. 9. - Issue 2. - Pp. 115-124.
122. Nelson, G.H. Lightweight structural concrete proportionality and control / G.H. Nelson, O.C. Frei // Journal American Concrete Institute Proceeding. - 1958. - N 54. - Pp. 605-622.
123. Novitskii, A.G. An unwoven basalt-fiber material for the encasing of fibrous insulation: an alternative to glass cloth / A.G. Novitskii, V.V. Sudakov // Refractories and Industrial Ceramics. - 2004. - Vol. 45. - N 4. - Pp. 239-241.

124. Oyedele, O.A. Assessment of adoption of modern methods of construction (MMC) in Nigeria / O.A. Oyedele // FIG Working Week 2016: Recovery from Disaster. - Christchurch, New Zealand, 2016. - P. 1.
125. Palchik, P.P. Control testing of fiber-concrete samples to determine their compression and tensile strength at bending / P.P. Palchik // Kyiv National University of Construction and Architecture Protocol No 64-1-11. - 2011.
126. Park, R. Evaluation of ductility of structures and structural subassemblages from laboratory testing / R. Park // Bulletin of the New Zealand National Society for Earthquake Engineering. - 1989. - N 22 (3). - Pp. 155-166.
127. Pfeifer, D.W. Reinforced lightweight concrete columns / D.W. Pfeifer // Journal of the Structural Division. - 1969. - Vol. 95. - Issue 1.
128. Priestley, M.J.N. Seismic design and retrofit of bridges / M.J.N. Priestley, F. Seible, G.M. Calvi. - New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.
129. Quattrociochi, G. Basalt fibres as a sustainable reinforcement for cement based mortars: Preliminary study / G. Quattrociochi, M. Albé, J. Tirilló, F. Sarasini, M. Valente, M.L. Santarelli // WIT Transactions on Engineering Sciences. - 2015. - Vol. 90. - Pp. 109-120.
130. Ramakrishnan, V. 1998 Performance Evaluation of 3-D Basalt Fiber Reinforced Concrete & Basalt Rod Reinforced Concrete / V. Ramakrishnan, N.S. Tolmare, V.B. Brik. - Final Report for Highway IDEA Project 45. - 1998.
131. Ramesh, K.V. Flexural studies on basalt fiber reinforced composite sandwich panel with profile sheet as core / K.V. Ramesh, K.B.H. Bharath, G. Smitha, R.I. Nagesh // Construction and Building Materials. - 2015. - Vol. 82. - Pp. 391-400.
132. Rattanachan, S. Korat Clays as Raw Materials for Lightweight Aggregates / S. Rattanachan, Ch. Lorprayoon // Science Asia. - 2005. - N 31. - Pp. 277-281.
133. Roy, B. Cyclic behaviour of in-situ exterior beam– column subassemblies with cold joint in column / B. Roy, A.I. Laskar // Engineering Structure. - 2017. - Vol. 132. - Pp. 822-833.

134. Sandrolini, F. An operative protocol for reliable measurements of moisture in porous materials of ancient buildings / F. Sandrolini, E. Franzoni // Building and environment. - 2006. - Vol. 41. - Issue 10. - Pp. 1372-1380.
135. Shideler, J.J. Lightweight-aggregate concrete for structural use / J.J. Shideler // Journal American Concrete Institute Proceeding. - 1957. - Vol. 54. - Issue 10. - Pp. 299-328.
136. Siddiqui, M.H. Effect of basalt, polypropylene and hybrid fibres on mechanical properties of concrete / M.H. Siddiqui, Md.T. Ahmad, M.K. Khan // International Journal for Science and Research in Technology. - 2016. - Vol. 2. - Issue 5. - Pp. 80-86.
137. Silver Bridge // Wikipedia. - 2012. - Available at: http://en.wikipedia.org/wiki/Silver_Bridge.
138. Sim, J. Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures / J. Sim, Ch. Park, D.Y. Moon // Composites Part B: Engineering. - 2005. - Vol. 36. - Issues 6-7. - Pp. 504-512.
139. Singh, N.T. Effective uses of light weight concrete / N.T. Singh // Journal of Civil Engineering and Environmental Technology. - 2016. - Vol. 3. - N 3. - Pp. 208-211.
140. Singha, K. A short review on basalt fiber / K. Singha // International Journal of Textile Science. - 2012. - Vol. 1. - N 4. - Pp. 19-28.
141. Stanish, K. Corrosion effects on bond strength in reinforced concrete: a thesis submitted in conformity with the degree requirements for the degree of Master of Applied Science / K. Stanish. - Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto, 1997.
142. Structural effects of corrosion // the website of FPrimeC. - 2016. - Available at: <http://www.fprimec.com/structural-effects-corrosion/>.
143. Sun, J.Y. Frost resistance characteristics of fiber concrete / J.Y. Sun // Journal of Building Materials. - 2013. - 16 (3). Pp. 437-440.
144. Tamrazyan, A.G. Behavior of corrosion-damaged compressed reinforced concrete elements under dynamic loading/ A.G. Tamrazyan, M.S. Mineev, V.S. Fedorov // CATPID - 2020. - Article N 913. – Pp. 022019.

145. Tamrazyan, A.G. Fire resistance of reinforced concrete corrosion-damaged columns of the “standard” fire / A.G. Tamrazyan, M.S. Mineev, S. Urasheva // *Key Engineering Materials*. – 2019. Vol. 828. – Pp. 163–169.
146. Technical guide Liapor. - Lias Vintirov LSM. - 2014.
147. Technobasalt // LLC “Technobasalt-Invest”. - Available at: <http://technobasalt.com/our-products/basalt-rebar/>.
148. Tomašić, I. Dynamics of capillary water absorption in natural stone / I. Tomašić, D. Lukić, N. Peček, A. Kršinić // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. - 2011. - Vol. 70. - Issue 4. - Pp. 673-680.
149. Tommy, Y.Lo. The effects of aggregate properties on lightweight concrete / Y.Lo. Tommy, W.C. Tang, H.Z. Cui // *Building and Environment*. - 2007. - Vol. 42. - Issue 8. - Pp. 3025-3029.
150. Tumadhir, M.B. Properties of Glass Concrete Reinforced with Short Basalt Fiber / M.B. Tumadhir // *Materials & Design*. - 2012. - Vol. 42. - Pp. 265-271.
151. Tumadhir, M.B. Thermal and mechanical properties of basalt fibre reinforced concrete / M.B. Tumadhir // *International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. - 2013. - Vol. 7. - N 4. - Pp. 334-337.
152. Velde, K. Basalt fibres as reinforcement for composites / K. Velde, P. Kiekens, L. Van Langenhove // *Proceedings of 10th International Conference on Composites/Nano Engineering*. - 2003. - Pp. 20-26.
153. Vijayalakshmi, R. Structural concrete using expanded clay aggregate: a review / R. Vijayalakshmi, S. Ramanagopal // *Indian Journal of Science and Technology*. - 2018. - N 11 (16). - Pp. 1-12.
154. Wang, H.T. Experimental study on static and dynamic mechanical properties of steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete / H.T. Wang, L.C. Wang // *Construction and Building Materials*. - 2013. - N 38 (2). - Pp. 1146-1151.
155. Wang, J. Experimental research on mechanical and working properties of non-dipping chopped basalt fiber reinforced concrete / J. Wang, Y. Zhang // 3rd

- International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering. - Kunming, China: IEEE, 2010. - Pp. 635-637.
156. Wang, M. Chemical Durability and Mechanical Properties of Alkali-proof Basalt Fiber and its Reinforced Epoxy Composites / M. Wang, Z. Zhang, Yu. Li, M. Li, Zh. Sun // Journal of Reinforced Plastics and Composites. - 2008. - N 27. - Pp. 393-407.
 157. Wilson, C. Cement mortar ship resists sea water thirty-four years cement mortar / C. Wilson. - 1954. - N 62. - Pp. 5-12.
 158. Wischers, G. Technology of structural lightweight concrete / G. Wischers, W. Manns // Lightweight Aggregate Concrete Technology and World Application. - Paris: CEMBUREAU, 1974. - Pp. 23-35.
 159. Wu, Z. Basalt FRP composite as reinforcements in infrastructure / Z. Wu, X. Wang, G. Wu. - 2010. - Available at: [http://wjoe.hebeu.edu.cn/ICCE-17%20proceedings%20Hawaii%20USA/Wu,%20Zhishen%20\(Ibaraki%20.,%20Hitachi,%20Japan\)%20%201135.pdf](http://wjoe.hebeu.edu.cn/ICCE-17%20proceedings%20Hawaii%20USA/Wu,%20Zhishen%20(Ibaraki%20.,%20Hitachi,%20Japan)%20%201135.pdf).
 160. Wu, Z. Static and dynamic compressive properties of ultra-high-performance concrete (UHPC) with hybrid steel fiber reinforcements / Z. Wu, C. Shi, W. He, D. Wang // Cement and Concrete Composites. - 2017. - N 79. - Pp. 148-157.
 161. Xie, Y. Research on mechanical properties of basalt fiber net reinforced sea sand cementitious thin plate / Y. Xie, J. Deng, L.G. Huang // Fiber Reinforced Plastics/Composites. - 2014. - Pp. 19-22.
 162. Xu, L.H. Effect of steel fiber and polypropylene fiber on the strength of high strength concrete / L.H. Xu, D.T. Xia, G.Z. Xia, Y. Chi. - 2007. N 29. - Pp. 58-60.
 163. Xu, S.L. A review on the development of research and application of ultra high toughness cementitious composites / S.L. Xu, H.D. Li // China Civil Engineering Journal. - 2008. - N 41 (6). Pp. 72-87.
 164. Yan, X. Durability of BFRP mesh-reinforced sea sand mortar thin plate / X. Yan, D. Jun, L. Lin // International Conference on Performance-based and Life-cycle Structural Engineering. - 2015. - Pp. 554-562.

165. Zhang, M.-H. Mechanical properties of highstrength lightweight concrete / M.-H. Zhang, O.E. Gjrv // *Aci Materials Journal*. - 1991. - Vol. 88. - N 3. - Pp. 240-247.
166. Zhang, W.H. Research on the static and dynamic compressive properties of high-performance cementitious composite (HPCC) containing coarse aggregate / W.H. Zhang, Y.S. Zhang // *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. - 2015. - Vol. 15. - N 3. - Pp. 711-720.
167. Zhongyu, L. Long-term durability of basalt fiber-reinforced polymer (BFRP) sheets and the epoxy resin matrix under a wet–dry cyclic condition in a chloride-containing environment / L. Zhongyu, X. Jianhe, Z. Huan, L. Jianglin // *Polymers*. - 2017. N 9 (12). - Pp. 652