

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Тольяттинский государственный университет»
Архитектурно-строительный институт
(наименование института полностью)
Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства
(наименование)
08.04.01 «Строительство»
(код и наименование направления подготовки)
Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений
(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Оценка несущей способности, жесткости и трещиностойкости
изгибаемых железобетонных элементов, изготовленных на
экспериментальном бетоне завода ЖБИ

Студент

Е.Э. Хутова

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

к.т.н., доцент, Д.С. Тошин

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Обзор литературы. Постановка задач исследования	7
1.1 История развития цементных бетонов	7
1.2 Физико-механические свойства бетона.....	10
1.2 Используемые материалы	18
Глава 2 Программа экспериментальных исследований.....	20
2.1 Разработка программы проведения испытаний исследуемых образцов	20
2.2 Характеристика и изготовление партии образцов (железобетонные балки, призмы и кубы) из экспериментального и классического бетона	21
2.3 Методика проведения испытаний исследуемых образцов	25
2.4 Подготовка опытных образцов и определения основных характеристик к проведению испытаний	31
Глава 3 Обработка результатов экспериментальных исследований исследуемых образцов.....	41
3.2 Метод расчета прочности нормального сечения железобетонных исследуемых балок	46
3.3 Расчет деформационной модели исследуемых железобетонных балок	47
3.4 Результаты испытаний исследуемых образцов	56
Заключение	65
Список используемой литературы и используемых источников.....	66

Введение

Цементный бетон применяется по всему миру как в строительстве, так и в других сферах деятельности более 180 лет. Из рецептуры основных компонентов с составом бетона, железобетона, пенобетона и других его разновидностей возводят множественное разнообразие зданий и сооружений любой конфигурации и объемов, от мостов до гидроэлектростанций.

Актуальность работы. Заводу изготовителю для оптимизации изготовления бетонных смесей и железобетонных изделий необходимо совершенствовать состав. Оптимизация состава подразумевает проведение контрольных мероприятий с оценкой показателей и сокращения издержек производства.

Основополагающим компонентом при производстве и реализации бетонной смеси является цемент. Сокращение издержек производства экспериментального бетона [33] происходит с учетом максимального значения прочности при минимальном расходе цемента в сборных железобетонных элементах.

Контрольные мероприятия обеспечивают надежность эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций по ГОСТ 18105-2010. Оценка прочности бетона по стандартным контрольным образцам-кубам является основным критерием для внесения изменений в производство. Основное требование прочности предъявляется к железобетонной конструкции [8, 30] или элементу, но необходимо не забывать про условия жесткости и трещиностойкости, которые можно получить за счет проведения комплексного исследования [45] призмочной прочности, модуля упругости и испытания железобетонных балок.

Цель исследований – оценка эффективности применения экспериментального бетона завода ЖБИ в изгибаемых элементах по критериям прочности, жесткости и трещиностойкости, на основании

сравнительного анализа испытываемых образцов, изготовленных из классического и экспериментального бетона.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие **задачи**:

- изучить научную литературу и публикации зарубежных и отечественных ученых по бетонам нетрадиционной рецептуры со сниженным расходом цемента;
- разработать программу многофакторного сравнительного исследования бетонных и железобетонных образцов;
- провести поэтапное исследование с определением кубиковой и призмочной прочности бетонов и модуля упругости на первом этапе, прочности, деформативности и трещиностойкости железобетонных балок на втором этапе;
- провести анализ лабораторных данных по прочностным и деформативным параметрам бетонов классического и экспериментального составов;
- численно оценить прочность, жесткость и трещиностойкость в сравнении результатов испытания «балок-близнецов» из экспериментального и классического бетона.

Предметом исследования магистерской диссертации является несущая способность, жесткость и трещиностойкость элемента, изготовленного на экспериментальном бетоне, путем эксперимента, исследования и обобщения публикаций, нормативной, учебной и научной литературы.

Объект исследования магистерской диссертации – железобетонные балки (проектный размер – $120 \times 140(h) \times 1540$ мм), стандартные образцы (кубы 150×150 мм, призмы $600 \times 150 \times 150$ мм), изготовленные из классического и экспериментального бетона завода ЖБИ.

Методы исследования, при написании научно-исследовательской работы, в рамках магистерской диссертации, использовались основные методы научного исследования такие как:

- эмпирический,
- теоретический.

Научная новизна диссертационной работы, заключается в:

- применении рецептуры бетонного состава завода ЖБИ разнофракционного песка (мелкий, средний и крупный) с учетом добавления большего количества пластификаторов, что обеспечивает сокращение количества цемента;

- проведении комплексного многофакторного исследования [41] и сравнительного анализа несущей способности, жесткости и трещиностойкости образцов кубов, призм и железобетонных балок, изготовленных из классического и экспериментального состава бетонной смеси (основанием служит заключенный Договор № 1122001 от 01.12.2020 г. на выполнение научно-исследовательской работы [47] с заводом ЖБИ);

- сокращении затрат производства при экономии цемента в составе экспериментального бетона.

Практическая значимость состоит в следующем:

- возможность применения в массовом строительстве экспериментального состава бетона, разработанного на заводе ЖБИ;

- удешевление производства бетонной смеси и железобетонных изделий по ГОСТ 13015-2012;

- научно обоснованном комплексном подходе оценки физико-механических параметров бетонов (ГОСТ 26633-2015) при оптимизации состава;

- применение модуля упругости в исследовательской работе помимо прочностных характеристик контрольных образцов-кубов.

Апробация и внедрение результатов работы велись в течение всего исследования. Теоретические положения и результаты исследования излагались в научных статьях, а также посредством участия на научно-практических конференциях и научно-исследовательских семинарах различного уровня:

- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практике (научно-исследовательская работа) 1, Тольяттинский государственный университет, декабрь 2019 г.;

- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практике (научно-исследовательская работа) 2, Тольяттинский государственный университет, май 2020 г.;

- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практике (научно-исследовательская работа) 3, Тольяттинский государственный университет, декабрь 2020 г.;

- научно-исследовательский семинар по итогам производственной практике (научно-исследовательская работа) 4, Тольяттинский государственный университет, апрель 2021 г.;

- научно-практическая конференция «Студенческие дни науки ТГУ», Тольяттинский государственный университет (Тольятти, 2021 г.);

- отчет по научно-исследовательской работе «Исследование и экспериментальная оценка несущей способности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, изготовленных на бетоне экспериментального состава» принятый по акту Заказчиком (завод ЖБИ).

Глава 1 Обзор литературы. Постановка задач исследования

1.1 История развития цементных бетонов

«За последние 60 лет цементные бетоны общестроительного назначения прошли три этапа своего развития. Первый этап, начавшийся со второй половины XIX века, продолжался до 1970 г. Бетоны этого периода могут быть названы бетонами старого поколения. Они содержат в своем составе четыре основных компонента цемент, песок, щебень, воду. Химические добавки использовались в основном в бетонах специального назначения: это пуццолановые, жаростойкие, из минеральных добавок, уплотняющие, противоморозные, ускорители и замедлители твердения. Сильные пластификаторы в бетонах начали применяться с 1969 г.» [25].

В период 1965-1970 годов компонентный состав сухого щебеночного бетона остался неизменным. Данный состав бетонной смеси состоит из цемента, песка и щебня, хотя в это время уже появились эффективные суперпластификаторы. Именно с этого периода началось повсеместное применение эффективных бетонов переходного поколения. В бетонах из жестких смесей повышение прочности составило на 40-50 процентов, а из пластичных смесей – на 20-30 процентов.

«В качестве пластификаторов с 1930 г. использовались в основном отходы производства: сульфидно-дрожжевая бражка, упаренная последрожжевая мелассная барда, сульфитно-спиртовая барда; лигносульфонаты – лигносульфонат технический, лигносульфонат технический модифицированный» [25]. В 1951 г. международный союз теоретической и прикладной химии ввел нормативное определение пластификатора как полимерной добавки.

«Второй переходной этап – период применения эффективных суперпластификаторов первого поколения, начался с 1970 г. Он

характеризуется рецептурой бетонов старого поколения, модифицированных суперпластификаторами (СП) на нафталиновой и меламиновой основе. В связи с тем, что такие пластифицированные бетоны переходного периода производятся в объеме, близком к 100%. К сожалению, нет статистических данных о производстве непластифицированных бетонов старого поколения без СП. Их производители оставляют без внимания значительные революционные преобразования в рецептуре бетонов» [25].

«1990 г. – начало эры эффективных суперпластификаторов второго поколения на карбоксилатной основе вместо нафталиновой. Однако в рецептуре, составе и структуре песчаных и щебеночных бетонов не произошло особых изменений. Кардинальным изменением являлось введение в 1995 г. пуццоланического микрокремнезема (МК), кислой золы и каменной муки. В этот период в передовых зарубежных странах бетоны становятся многокомпонентными, включающими 6-7 компонентов за счет использования МК и дисперсных наполнителей – кварцевой (микрокварц) и каменной муки (базальтовой, гранитной, известняковой и др.). В России бетоны нового поколения не производятся и в настоящее время» [25].

«Нельзя сказать, что порошковая активация бетонов не использовалась во втором переходном периоде и в начале третьего периода, но такая активация не преследовала целей кардинально изменить реологию бетонных смесей с суперпластификаторами. Основное ее назначение – снизить расход цемента в бетонах переходного поколения за счет активных тонкодисперсных наполнителей. Полиструктурная теория [36], разработанная академиком В.И. Соломатовым и развития его научной школой, предусматривала введение тонкодисперсных наполнителей в количестве 20-40 процентов взамен цемента. При этом устанавливался максимум прочности в функции объемного содержания наполнителя» [25].

«Третий период предусматривал получения высокопрочных и особовысокопрочных бетонов путем добавления в бетон переходного поколения значительного количества порошкового дисперсного

наполнителя, необходимых количеств микрокремнезема и тонкозернистого песка фракции $0,1-0,5 \div 0,16-0,63$ мм» [25].

Взяв во внимания весь период эволюции состава бетона можно выделить несколько революционных периодов перехода бетонного состава по компонентному наполнению (рисунок 1).

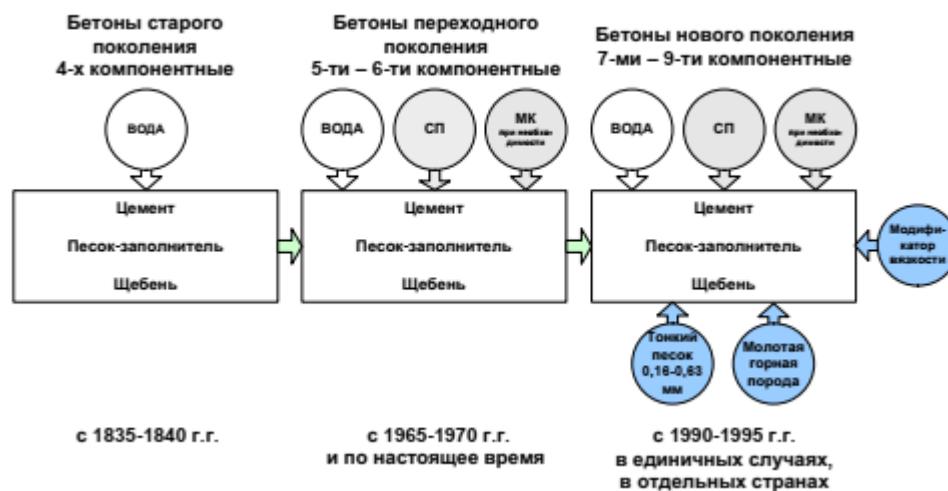


Рисунок 1 – Этапы развития компонентного соотношения бетонных составов [25]

Подведя итоги развития состава бетона и повышения прочности можно подчеркнуть, что в период 1965-1970 годов изобретение суперпластификаторов в основе которых лежит нафталин и меламинасульфонат помогло применять в промышленном производстве бетоны почти во всех странах по сей день. Новаторством [20, 25] в технологии создания щебеночных и песчаных бетонов является введение в состав бетона порошковых составляющих песка или кремнезема. Применение суперпластификаторов на основе поликарбоксилата послужило появлению бетона нового поколения. Бетон нового поколения – это реакционно-порошковый самоуплотняющийся бетон с мелкими кварцевыми

песками и микрокремнеземом. Создание бетона нового поколения лежит в основе возведения уникальных зданий и сооружений.

1.2 Физико-механические свойства бетона

Определяющим физико-механических свойств бетона лежит состав, структура основных компонентов, технология изготовления конструкций или изделий, а также вида их напряженного состояния в конструкции [7].

Основными физико-механическими свойствами бетона являются прочность, плотность, пластичность, водонепроницаемость и огнестойкость. В зависимости от назначения зданий и сооружений бетон должен удовлетворять специальным требованиям. Состав бетонов и структура компонентов, применяемых для несущих железобетонных конструкций, следующие:

- тяжелый бетон – бетон плотной структуры, на плотных заполнителях, крупнозернистый, на цементном вяжущем, при любых условиях твердения;

- мелкозернистый бетон – бетон плотной структуры, тяжелый, на мелких заполнителях, на цементном вяжущем при любых условиях твердения;

- легкий бетон – бетон плотной структуры, на пористых заполнителях, крупнозернистый, на цементном вяжущем, при любых условиях твердения.

Бетон, обладающий заданной прочностью и удовлетворяющий специальным требованиям [21], подбирают по количественному соотношению необходимые составляющие материалы: цементы различного вида, крупные и мелкие заполнители, добавки различного вида, обеспечивающие удобоукладываемость смеси или морозостойкость и другое.

Рассмотрим по отдельности плотность и пористость, которое оказывает определяющее влияние на состав, а также взаимосвязь структуры и физико-механических свойств бетона.

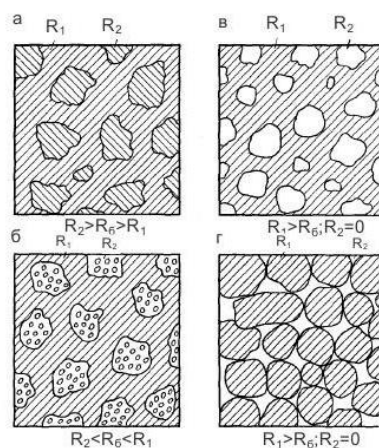
1.2.1 Некоторые элементы структуры и свойства бетона

Бетон является искусственным строительным материалом в составе которого присутствуют твердые (цементный камень, гранитный щебень), сыпучие (разнородный песок, цемент, специальные добавки) и жидкие (вода) компоненты заполнителя.

Система бетона сложна и многофазна, в которой основным компонентом является цементный камень и дополнительно равномерно распределенными включениями (мелкие и крупные заполнители). Процесс формирования бетонной смеси в затвердевший камень происходит путем смешивания основных компонентов из крупного и мелкого заполнителя, жидкости, вяжущих и специальных добавок. Такой процесс можно разделить на два состояния материала:

- пластичное состояние бетонной смеси в период до схватывания цемента и превращения бетона в твердое тело;
- в твердое тело бетона в период твердения и эксплуатации элемента.

Одно из основных технических свойств бетона – долговечность, в течение которого в зданиях и сооружениях эксплуатационные качества сохраняются на заданном проектном уровне в соответствии с нормативными сроками службы. В определенных условиях технические свойства строительных конструкций зависят от составляющих компонентов бетонной смеси, объема и характера пористости. Взяв во внимание плотность бетона можно разделить его на классовую структуру. На рисунке 2 представлены основные типы макроструктуры бетона.



а – плотная; б – плотная с ячеистым заполнителем; в – ячеистая; г – зернистая; R_b – средняя прочность структуры; R_1 и R_2 – прочность составляющих бетонов

Рисунок 2 – Основные классы укрупненной структуры бетона [23]

Можно выделить ряд особенностей свойств бетонной смеси в зависимости от структуры и свойств составляющих компонентов. Рассмотрим следующие свойства бетона:

- подвижность, с учетом влияния механических воздействий;
- потеря подвижности, с учетом постоянного влияния физико-химических процессов, данный процесс распространен под названием гидратация (переход от жидкого или пластичного цементного клея в цементный камень).

Структура бетона неоднородна. Неоднородность структуры характеризуется объемами и составами используемых материалов, которые заметно влияют в совокупности на общий состав бетона. Могут различаться по свойствам не только цементный камень и заполнитель, но и отдельные зерна заполнителя друг от друга и отдельные микрообъемы цементного камня. Контактная зона, так же неоднородна, как и основной массив цемента. В контактной зоне содержатся более или менее дефектные места, непрореагировавшие зерна, микротрещины и другие элементы, снижающие однородность материала.

В левой части рисунка 3 показано ячейка структуры бетона, а в правой возможное изменение прочности бетона по сечению образца. Наглядно показана неоднородность структуры, включающая плотный и прочный материал с разными свойствами, переходные зоны, пустоты. Прочность обусловлена неоднородностью структуры бетона по объему, которая колебаться в разных изделиях и образцах с учетом структуры и свойств бетона, изготовленных из одного и того же состава.

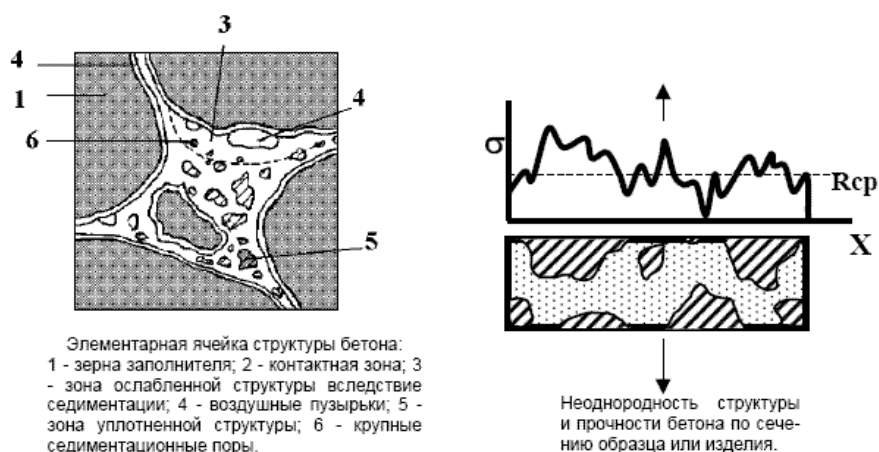


Рисунок 3 – Распределение частиц неоднородного заполнителя в цементной смеси [23]

Прочность и плотность бетона зависит от взаимодействия между частицами, которые в свою очередь имеют различную физическую природу происхождения, размер, объем, присутствие посторонних веществ, а также от протекания процессов в жидкой фазе.

Разнородность размеров зерен песка и щебня между собой велики, удельная поверхность частиц мала, поэтому действие поверхностных сил практически не имеют влияния. В такой смеси отсутствует связность компонентов, и вода легко вытекает между зернами заполнителей под действием гравитационной силы.

При уменьшении размеров частиц до 1-0,1 мм возникает капиллярный эффект подъемной силы, приобретая связанность частиц. Действие капиллярных сил происходит при отсутствии излишек количества воды, в местах взаимодействия с твердыми частицами, в то время как поры между частицами заполнены воздухом. Действие сил поверхностного натяжения в образующемся водосодержащем песке обеспечивает сцепление между частицами.

Согласно современному представлению при взаимодействии поверхностей твердых частиц и воды, молекулы воды способны притягиваться под действием силовых полей твердых частиц. В период такого взаимодействия происходит уплотнение частиц твердого тела, вследствие не скомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия (адсорбция).

Образование на поверхности конструкции или элемента полутвердых водных оболочек, подразумевают две функции развития. Первая функция – оболочка придает связанность и устойчивость цементной суспензии. Данная функция способствует сопротивлению деформациям, не нарушая сплошности и формы изделия под действием внешних сил. Вторая функция – оболочка облегчает скольжение твердых частиц за счет образования молекул воды в плоскости и действия отталкивающих сил, в местах слабых водородных связей.

Проявление всех выше упомянутых сил проявляются в бетонной смеси за счет содержания разного размера частиц. Характер структуры и взаимодействие между частицами могут повлиять на бетонную смесь. В потере подвижности играет важную роль мельчайшие частицы, которые посредством осадки прилипают к поверхности более крупных частиц. Для увеличения подвижности смеси часто добавляют большее количество воды, но тем самым снижает сцепление бетонной смеси.

1.2.2 Прочность бетона

В строительных конструкциях в основном бетон подвергается сжимающим напряжениям, так как его прочность выше в 10-20 раз, в отличие от растяжения и изгиба. Поэтому при упоминании о прочности бетона, подразумевают прочность на сжатие [27].

Набор прочности бетона происходит постепенно. В процессе оптимального температурно-влажностного режима прочность бетона увеличивается в период длительного времени, но скорость набора прочности со временем уменьшается (рисунок 4).

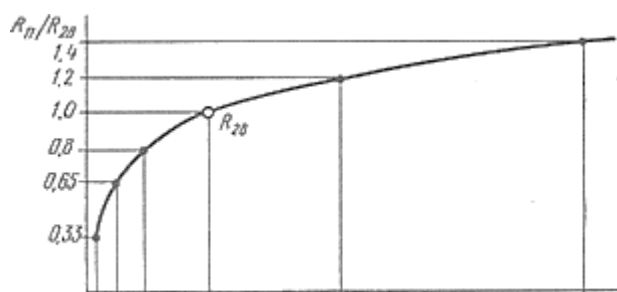


Рисунок 4 – Пропорциональность изменение прочности бетона во времени [22]

«Основной контролируемой характеристикой бетона является его прочность на сжатие, определяемая термином «класс бетона».» [23]. За эталон прочности бетона при сжатии принята кубиковая прочность R_k , получаемая испытанием на прессе до разрушения бетонных кубов $15 \times 15 \times 15$ см. Класс бетона на заводе-изготовителе оценивается по кубиковой прочности, что связано с удобством контроля. Методы определения прочности бетона регламентированы ГОСТ 10180-2012.

Прочность бетона зависит от составляющих его компонентов и сцепления их между собой. Беря во внимание прочность заполнителя, которая выше прочности бетона, сам по себе мало влияет на общую

прочность. Общая прочность бетона состоит из твердого тела и сцепления заполнителей.

Прочность цементного камня зависит от двух факторов: марки цемента и водоцементного соотношения. Даже с высокой маркой цемента, при равных условиях, цементный камень будет прочнее. Прочность твердения цемента зависит от связывания 20-25 процентов воды, что помогает обеспечить необходимую подвижность смеси. Для обеспечения подвижности бетонной смеси, необходимо химически связывать 40-80 процентов воды от массы цемента. Прочность бетона понижается при большем количестве не связанной воды в составе, которая повышает пористость цементного камня.

В лабораториях заводов ЖБИ при выполнении подобных исследовательских работах в первую очередь оценивается прочность бетона по контрольным образцам (кубиковая прочность). Известно, что к готовому железобетонному изделию предъявляются не только требования прочности, но также конструкция должна удовлетворять условиям жесткости и трещиностойкости [47].

1.2.3 Пористость бетона

При производстве работ в бетонную смесь часто вводят в состав около 2-4 раз больше воды, чем цемент может связать, тем самым приводя к образованию пор. Изменения пористости бетона возможно за счет снижения содержания количества воды в цементном тесте бетона [43].

Средняя пористость в бетоне составляет 5-7 процентов в плотно уложенном и затвердевшем бетоне. Такое процентное содержание пористости непроницаемо для воды, но не для нефтепродуктов или газов.

Одна из характеристик бетона – пористость, которая обусловлена параметрами порового пространства. Параметр порового пространства определяется за счет:

- пористости, которая является частью объема;
- внутренней удельной поверхности пор, то есть площади или доступной поверхности в единице объема или массы данного вещества;

– разделения пор по размерам, в частности разделением общего объема пор на поры в пределах некоторого диапазона размеров в зависимости от вида структуры.

Взаимоотношения цементного камня с водой и микроструктуры для описания этих процессов разработаны различные модели – Пауэрса, Исхай, Фельдмана – Середы. Пространство между частицами новообразований (гелевые поры) характеризуется весьма малыми размерами (ширина около 1,5 нм), соизмеримыми с размерами молекул воды. При гидратации цемента образуются и другие категории пор (рисунок 5).

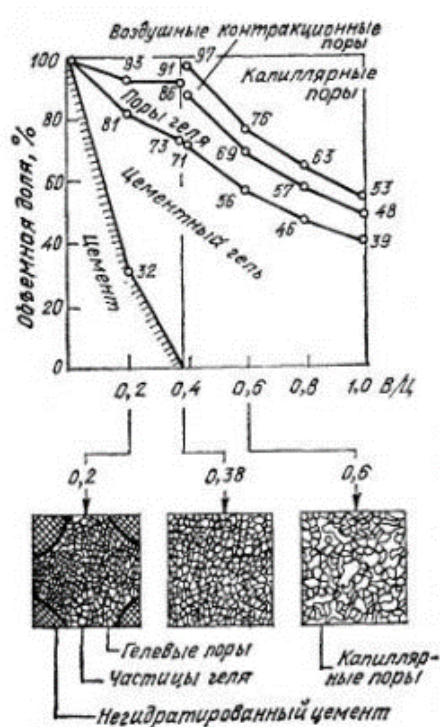


Рисунок 5 – Распределение пористости в цементном камне [23]

По размеру и происхождению поры в цементном камне классифицируются на поры геля 0,5-30 нм, капиллярные и контракционные поры от 30 нм до 50 мкм, микровоздушные поры 0,1-1 мм, поры уплотнения 1 мм.

1.2 Используемые материалы

Бетон представляет собой вид однородной массы, посредством соединения в составе вяжущих веществ (цемент), наполнителей крупнофракционных и мелкофракционных (щебень, песок), улучшающих добавок (пластификаторы), а также одного из важных компонентов – воды.

В каждом составе бетона производят анализ и расчет компонентов, который тщательно соблюдается при составлении пропорций в смеси, основанием служит ГОСТ 7473-2010 «Смеси бетонные. Технические условия (с Поправкой)».

В данной работе представлен следующий укрупненный состав бетонной смеси, состоящий из следующих компонентов: цемент М500, песок – крупный, средний и мелкий, щебень, суперпластификатор (поликарбоксилат) и вода.

Отличительной особенностью экспериментального состава бетонной смеси является применение поликарбоксилатного суперпластификатора с относительно повышенным расходом (до 1,5 процента) и использование разнофракционного песка, обеспечивающих более компактную компоновку инертных в структуре бетона, уменьшение пористости и пониженный расход цемента при сохранении прочностных свойств. Расход поликарбоксилата при этом устанавливался существенно ниже – до 0,5 процентов. В связи с имеющимися отличиями в составах бетонной смеси расход воды при подготовке экспериментального состава назначался примерно в 2 раза меньше при сохранении одинаковой подвижности (осадка конуса 16-18 см).

Вывод по первой главе

В первой главе проанализированы факторы, влияющие на основные показатели свойств бетона и железобетона. Обобщением приведенной выше информации служит анализ взаимосвязи структуры и свойств бетона и применения полученных знаний к экспериментальному бетону завода ЖБИ по ГОСТ 25192-2012. Учитывая структуру исследуемого бетона, при

уменьшении пористости получаем более плотную консистенцию бетонной смеси, которая характеризуется применением разнофракционного песка. Данное сочетание компонентов помогло уменьшить количество добавляемого цемента в бетонную смесь. Учитывая добавляемые компоненты подвижность бетона уменьшается, для оптимизации состава было увеличено количество добавляемых пластификаторов. Этот подход не является затратным за счет применения трех разновидностей песка (необходимо учитывать его хранение и сортировку), а также добавления значительного количества пластификаторов, так как оптимизация состава происходит за счет уменьшения количества добавляемого цемента. Себестоимость цемента на нынешний момент при данной технологии производства бетона представляет существенную разницу в цене.

Проведенный анализ публикаций и других источников информации помог изучить физико-механические и физико-химические свойства исследуемого бетона.

Изучение свойств экспериментального бетона, разработанного заводом ЖБИ и методов расчета таких показателей как прочность, модуль упругости, жесткость, деформативность и трещиностойкость способствует проведению экспериментальных исследований.

Глава 2 Программа экспериментальных исследований

2.1 Разработка программы проведения испытаний исследуемых образцов

Многие заводы ЖБИ в стремлении сократить издержки производства прибегают к оптимизации составов бетонных смесей. Вносимые изменения в рецептуру в обязательном порядке должны сопровождаться проведением сопутствующих лабораторных исследований, направленных на контроль основных показателей, регламентируемых нормативными документами и учитываемых в проектах. Заводы, производящие железобетонные изделия, преимущественно контролируют прочностные показатели по образцам-кубам, что в первую очередь направлено на обеспечение требований предельных состояний [4, 5] первой группы в готовой продукции. Как известно, к элементам железобетонных конструкций предъявляются не только требования прочности, также должны соблюдаться условиям жесткости и трещиностойкости.

В рамках научно-исследовательской работы планируется испытать и сравнить характеристики опытных образцов (кубы, призмы, балки) из экспериментального и классического бетона.

Программа испытаний предусматривает сравнение параметров экспериментального и классического бетонов посредством изучения кубиковой и призмной прочности, модуля упругости, а также несущей способности, прогибов, средних деформаций продольной растянутой арматуры и бетона сжатой зоны в изгибаемых железобетонных элементах [1]. Программа испытаний включает в себя следующее:

– проведение испытаний на сжатие стандартных образцов-кубов и образцов-призм с приложенной кратковременной нагрузкой (СП 20.13330.2016), для определения прочности и модуля упругости бетона из

классического – далее «К» и экспериментального – далее «Э» состава. Испытано 8 стандартных образцов, включающих 2 серии бетона «К» и «Э» в количестве двух образцов кубов и призм каждого вида бетона. Размеры составляют для кубов 150×150×150 мм, для призм 150×150×600 мм;

– проведение испытаний на изгиб с приложенной нагрузкой к эталонным образцам-балкам из «К» бетона. Испытано два образца железобетонных балок первой серии из «К» бетона (проектный размер 120×140(h)×1540 мм);

– проведение испытаний на изгиб с приложенной нагрузкой к исследуемым образцам-балкам из «Э» бетона. Испытано два образца железобетонных балок второй серии из «К» бетона (проектный размер 120×140(h)×1540 мм).

Программа исследования и определение количества стандартных (кубы, призмы), эталонных (балки из «К» бетона) и исследуемых (балки из «Э» бетона) образцов, базировалась на лабораторных испытаниях бетонных и железобетонных образцов на основании ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 24452-80 и ГОСТ 8829-2018.

2.2 Характеристика и изготовление партии образцов (железобетонные балки, призмы и кубы) из экспериментального и классического бетона

Изготовление каркасов, опытных образцов и подбор состава «К» и «Э» бетона выполнялся на заводе ЖБИ. Количество образцов приведено в таблице 1, а армирование образцов-балок предусматривает пространственный каркас с продольной и поперечной арматурой таблицы 2-3. Для чистоты исследования изготовление кубов, призм и балок произведено из одной партии бетонной смеси.

Таблица 1 – Перечень образцов для экспериментальных исследований

Наименование образца, размеры (мм)	Класс и состав бетона (К – «классический» состав; Э – «экспериментальный» состав)	Армирование	Количество образцов (шт)
Куб 150150×150×150	B20, К	–	2
	B20, Э	–	2
Призма 600×150×150	B20, К	–	2
	B20, Э	–	2
Балка 1560×100×150(h)	B20, К	A1	1
	B20, К	A2	1
	B20, Э	A1	1
	B20, Э	A2	1

Схема каркасов [38] A1 и A2 на образцы (балка) представлено на рисунке 6, образцы (призмы и кубики) не армируются [37].

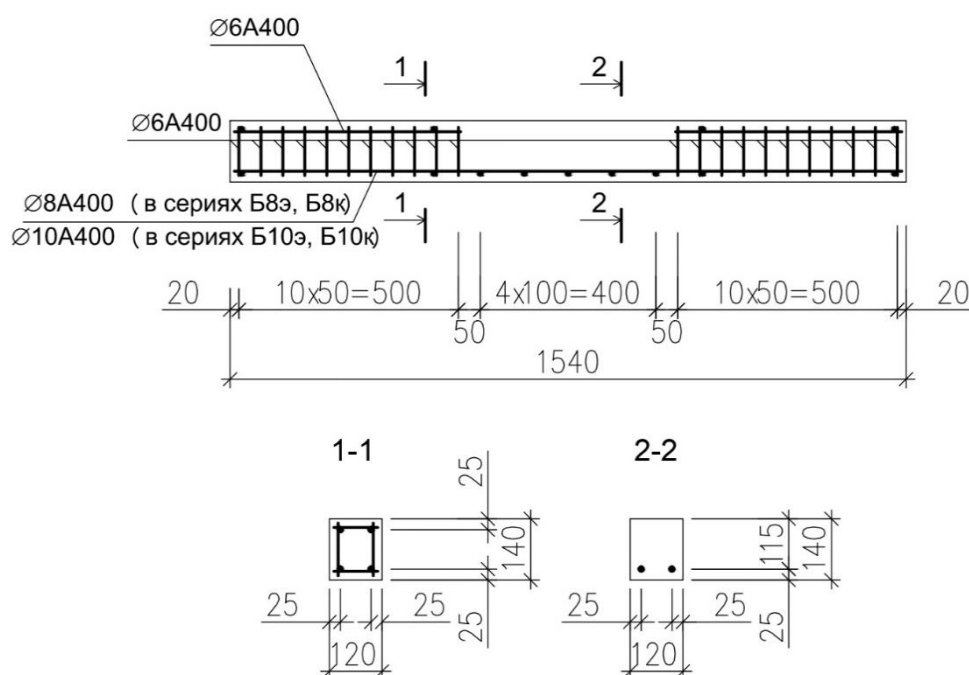


Рисунок 6 – Схема расположения каркасов в контрольных образцах

Таблица 2 – Армирование каркасов А1 опытных образцов

Поз.	Наименование арматуры	Количество стержней (шт)	Примечание
1	Ø10 A400 l=1520 мм	2	Продольная рабочая арматура
2	Ø6 A400 l=520 мм	4	Продольная конструктивная арматура
3	Ø6 A400 l=120 мм	44	Поперечная рабочая арматура
4	Ø6 A240 l=100 мм	13	В крайних третях пролета – для формирования пространственного каркаса В средней трети пролета – концентраторы трещин
5	Втулка (индивидуальное изготовление)	4	Для крепления приборов измерений (мессур). Перед бетонированием внутреннюю резьбу защитить ватой

Таблица 3 – Армирование каркасов А2 опытных образцов

Поз.	Наименование арматуры	Количество стержней (шт)	Примечание
1	Ø8 A400 l=1520 мм	2	Продольная рабочая арматура
2	Ø6 A400 l=520 мм	4	Продольная конструктивная арматура
3	Ø6 A400 l=120 мм	44	Поперечная рабочая арматура
4	Ø6 A240 l=100 мм	13	В крайних третях пролета – для формирования пространственного каркаса В средней трети пролета – концентраторы трещин
5	Втулка (индивидуальное изготовление)	4	Для крепления приборов измерений (мессур). Перед бетонированием внутреннюю резьбу защитить ватой

Набор прочности производился на заводе-изготовителе в нормальных условиях температурно-влажностного режима.

Состав экспериментального бетона включает следующие компоненты:

– цемент (Ц) марки М500 – в качестве вяжущего компонента бетонной смеси;

– три сорта песка (П): крупный, средний и мелкий фракции от 1,5 мм до 3,0 мм – в качестве мелкого заполнителя;

– гранитный щебень (Щ) размером 5-20 мм – в качестве крупного заполнителя;

– суперпластификатор (С) – поликарбоксилат, для регулирования свойств бетонной смеси;

– вода (В), количество которой определялось для бетона класса В20 в зависимости от влажности песка и щебня, а также требуемой подвижности смеси по ГОСТ 23732-2011.

Для бетона класса В20 идет следующее объемное соотношение [3] компонентов бетонной смеси Ц/П/Щ – 1:2:4.

Армирование опытных балок осуществлялось плоскими сварными каркасами. Для рабочих и конструктивных стержней использовалась стальная горячекатаная арматура, диаметр и марка стали которой приведена в таблицах 2-3. Для чистоты эксперимента все арматурные стержни были из одной партии без погибов, коррозионных повреждений по СП 28.13330.2017 и повреждений рифов [7].

В качестве опалубки для стандартных образцов были использованы металлические формы для куба ФК-150 (150×150×150 мм), для призм ФП-150 (150×150×600 мм) на основании ГОСТ 22685-89.

Транспортировка образцов с завода ЖБИ производилась по истечении 28 суток после изготовления с соблюдением необходимых мер по предохранению их от повреждений [7] и влияния погодных условий в лабораторию Тольяттинского государственного университета, где образцы хранились до испытания. В период хранения опытных образцов температурно-влажностный режим сохранял стабильные температурные параметры, без резких положительных и отрицательных скачков температуры.

2.3 Методика проведения испытаний исследуемых образцов

Экспериментальные испытания опытных образцов были проведены на гидравлической прессе П-250 и испытательном стенде, описанном в работе Ерышева А.В., Колганова Ю.А., Горшенина Е.В. [39].



Рисунок 7 – Вид испытательного гидравлического пресса П-250

Как видно из рисунка 7, устройство гидравлического пресса П-250 основано на торсионном силоизмерителе. Приложенная нагрузка к вспомогательным образцам (кубы, призмы) отражается на аналоговый двухдиапазонный циферблат. Силовой модуль пресса для нагружения оснащен двумя винтовыми вертикальными колоннами, с помощью электрического привода для вертикального перемещения верхней траверсы. Контроль нагрузки осуществлялся при помощи шкалы силоизмерителя встроенного в систему гидравлического пресса.

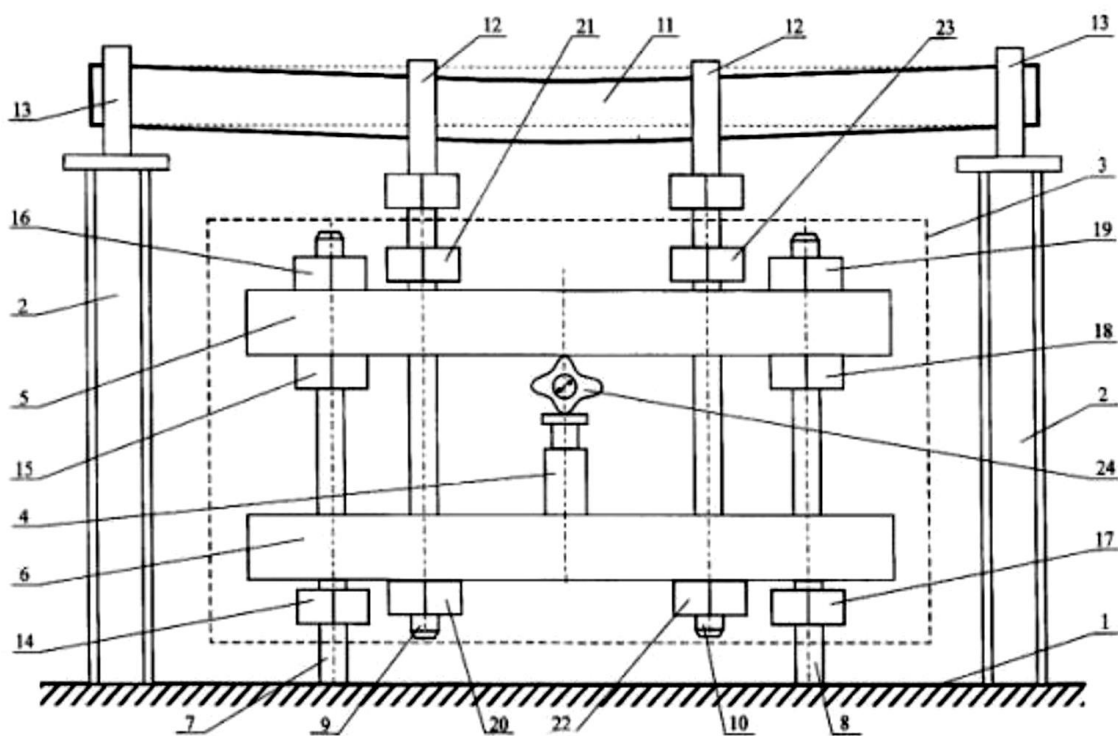


Рисунок 8 – Вид испытательной установки для железобетонных балок [39]

Как видно из рисунка 8, испытательная установка основана на давлении посредством хомутов 12 закрепленного на балочной конструкции 11 среднего пролета балки. Исследуемую балку 11 устанавливают на две опорные стойки, прикрепляя к нижней грани шарнирно-подвижную и шарнирно-неподвижную опоры (пластины с трубками). Нагружение изгибаемых железобетонных образцов [42] осуществлялось с помощью гидравлического домкрата 4, контроль нагрузки осуществлялся динамометром ДОС-5, а нагрузка передается через реверсивный механизм 3. Направление усилия придается положением регулировочных гаек 14-23 на тягах 7 и 8 и 9 и 10, что дает возможность балочной конструкции 11 деформироваться в плоскости действия изгибающего момента с изменением прогиба. Для создания прогиба в нижней части образца, необходимо гайки 14, 17, 21 и 23 отвернуть, тем самым освободив распределительную траверсу 6, давая ей свободный ход вниз под действием источника нагрузки 4, а гайки

16 и 19 поджать к траверсе 5, тем самым ограничить движение вверх. При приложении усилия домкратом 4, траверса 6, опираясь на гайки 20 и 22, начинает тянуть тяги 9 и 10 вниз, которые подвешены на балочной конструкции 11, нагружающей ее, создавая определенный изгибающий момент. Данный момент воздействует на балочную конструкцию 11 в местах установки тяг 9 и 10. Используя несложную и компактную установку посредством предлагаемых технических решений, есть возможность испытать балочные конструкции без перестановки на знакопеременные нагрузки [39].

Определение деформаций предусматривало установку прогибомеров Аистова, тензометров Гугенбергера и мессур с индикаторами часового типа. Прогибомерами Аистова измеряли вертикальные перемещения балок в середине пролета и на опорах с последующим вычислением прогибов, исключая осадку опор. Тензометры Гугенбергера устанавливались на базе 100 мм на верхней (сжатой) грани. Мессуры на базе индикаторов часового типа фиксировались на балках через резьбовые втулки, жестко закрепленные к стальной арматуре посредством сварки. Индикаторы часового типа и удлинители мессур устанавливались на боковых гранях на уровне центра тяжести продольных стержней. Измерение деформаций бетона в сжатой зоне ε_b и средних деформаций арматуры ε_s по двум приборам позволило повысить достоверность результатов. При последующей обработке результатов учитывались усредненные значения ε_b и ε_s .

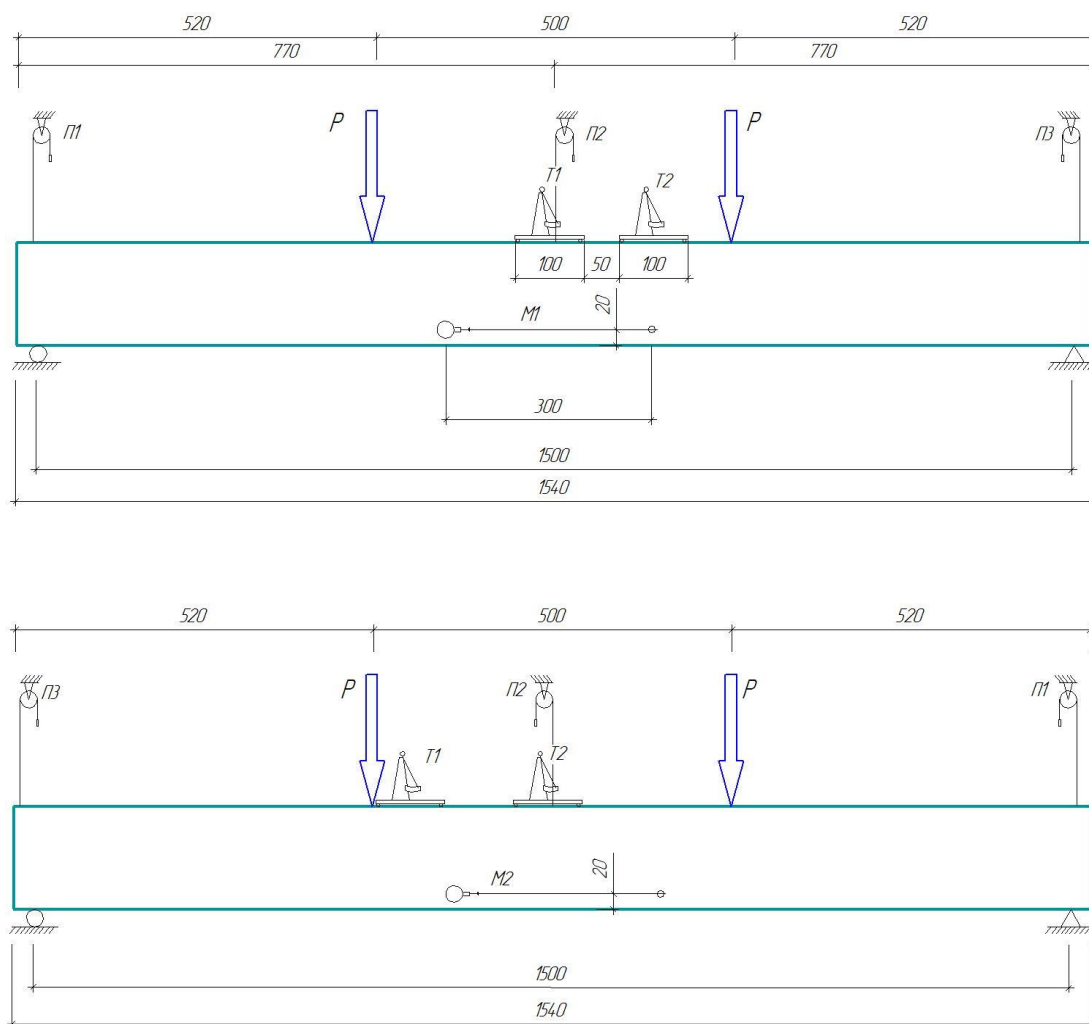
Измерительные приборы для проведения испытаний железобетонных балок позволяют регистрировать следующие параметры:

- период времени приложенного усилия (секундомер t , сек);
- линейное перемещение отдельных точек конструкции при нагружении исследуемого объекта (прогибомеры Аистова (марки 6ПАО) П1-П3, мм);
- линейная деформация арматуры в точке приложенной нагрузки (мессуры М1-М2, мм);

– линейная деформация в четырех точках исследуемого объекта (тензометры Гугенбергера Т1-Т2, Н);

– усилия, приложенные к объекту исследования (динамометр Д1, кН).

Схема установки испытаний контрольных образцов представлена на рисунке 9.



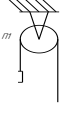
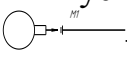
-  – прогибомер Аистова 6ПАО (цена деления 0,01 мм);
 – тензометр Гугенбергера на базе 100 мм (цена деления 0,001 мм), установленный на верхнюю горизонтальную сжатую грань;
 – мессура на основе индикатора часового типа (цена деления 0,01 мм) с базой 300 мм.

Рисунок 9 – Схема установки испытаний контрольных образцов

Установка для испытаний кубов и призм позволяла регистрировать следующие параметры:

- период времени приложенного усилия (секундомер t , сек);
- линейная деформация по четырем граням исследуемого объекта (тензомер Гугенбергера, Н);
- усилие, приложенная к объекту исследования (пресс, кгс).

Машины, приборы и средства измерения, применяемые при испытаниях вспомогательных (призмы и кубы), эталонных и исследуемых (балки) образцов, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Перечень применяемых машин, приборов и средств измерения

Поз.	Наименование, тип, марка оборудования или средств измерения	ГОСТ, ТУ, технические характеристики	Примечание
1	2	3	4
Для кубов			
1	Пресс	ГОСТ 28840-90	Проведение испытаний на сжатие
2	Центрирующее устройство	ГОСТ 10180-2012	Центрирование образцов на плите пресса
Для призм			
3	Линейки металлические с ценой деления 1 мм	ГОСТ 427-75	Измерение образцов и определение расположения прижимных приспособлений
4	Рамки стальные	Обеспечение расположения базы измерений продольных деформаций не более $2/3$ высоты образца	Фиксирование на образцах приборов для измерений
5	Тензометры	ГОСТ 18957-73	Измерение деформаций
6	Центрирующее устройство	ГОСТ 10180-2012	Центрирование образцов на плите пресса
Для балок			
7	Экспериментальный стенд	ГОСТ 28840-90	Проведение испытаний на изгиб
8	Прогибомеры	ТУ 3949-165-60632410-2012	Измерение перемещение конструкции при нагружении

Продолжение таблицы 4

1	2	3	4
9	Мессура	ГОСТ 1.0-2015	Измерение деформации арматуры в точке приложенной нагрузки
10	Тензометры Гугенберга	ГОСТ 18957-73	Измерение деформаций в шести точках
11	Динамометр	ГОСТ Р 55223-2012	Измерения усилия приложенное к объекту исследования

Все приборы и средства измерения откалиброваны и своевременно проходили метрологическую аттестацию по ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009.

После каждого шага нагружения снимаются показания по приборам в середине пролета и по краям экспериментальной балки. Нагрузка прикладывается симметрично поэтапно (каждый этап – 70 кг), к верхней полке в двух точках посредством траверсы и тег на расстоянии 500 мм от крайних опор. Величина нагрузки контролируется показаниями динамометра. В эксперименте использовался динамометр марки ДОС-5, домкрат марки ЭНЕРПРЕД модель ДП20П50 грузоподъемностью 20,0 тс. Отсчет контролируемых значений по этапам нагрузки определялся с помощью тарировки делений манометра по линейной зависимости между нагрузкой и усилием, возникающем в динамометре (домкрат ДОК-5). Значения деформаций бетона отслеживалось тензометрами Гугенберга в среднем пролете железобетонной балки, установленными с шириной базы 50 мм. С помощью многооборотного прогибомера Аистова типа 6ПАО с ценой деления 0,01 мм, установленными на стальные тэжи с противовесом в 1 кг определялось линейное перемещение в трех точках (по краям и в середине) балки. Данные прогибомеров позволили снимать значения до полного разрушения испытуемого образца. Данные с мессур расположенные в середине пролета с базой измерения 300 мм отслеживали линейные деформации продольной арматуры в нижней части балки. Прибор мессура

состоит из индикатора часового типа с ценой деления 0,001 мм и гладкой арматуры с плоским наконечником под индикатор, установленные в специальные держатели, вкрученные во втулки балки с подсоединением к продольной арматуры, расположенные по обе стороны балки.

2.4 Подготовка опытных образцов и определения основных характеристик к проведению испытаний

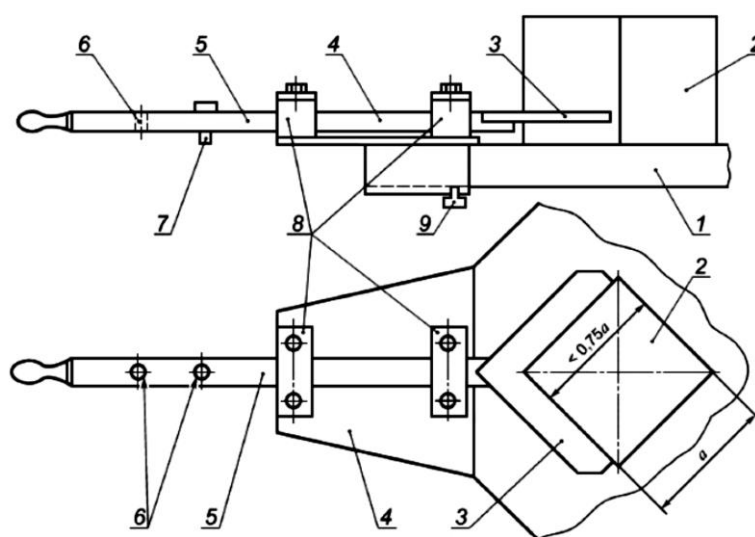
Программа экспериментальных исследований включает испытание образцов. Вначале определялась кубиковая прочность по двум стандартным образцам-кубам каждой серии состава из экспериментального и классического бетонов. Затем были испытаны образцы-призмы (по два образца каждого состава) для установления призмочной прочности и модуля упругости. В конце было предусмотрено испытание железобетонных образцов на изгиб [42] по двум вариантам армирования. Проектные размеры сечения балок составили $b \times h = 120 \times 140$ мм, расчетный пролет 1500 мм. Балки серии Б10э и Б10к армировались продольной арматурой двумя стрежнями диаметром 10, балки серии Б8э и Б8к – арматурой двумя стержнями диаметром 8, индекс «э» и «к» характеризует экспериментальный и классический состав бетона соответственно. Всего было испытано четыре опытные балки. Экспериментальные исследования исследуемых образцов разбиты на ряд этапов.

Первый этап основан на подготовке контрольных образцов к испытаниям. Испытания на сжатие контрольных образцов для установки прочности кубов и призм, модуля упругости призм посредством гидравлического пресса. В рамках подготовки к проведению испытаний был изучен ГОСТ 24452-80, правила эксплуатации пресса и приборов, инструкция по безопасности труда. Все испытания проводились в соответствии с ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 24452-80.

Непосредственно перед проведением испытаний образцы осматривались на предмет наличия дефектов, сколов и, по необходимости, удалялись неровности. После визуального осмотра были проведены измерения фактических размеров контрольных образцов каждой партии. Полученные размеры сравнены с эталонными, которые приведены в таблице 1.

Далее требовалось разметить образцы под расположение рамок, а также для центрирования образцов по оси пресса.

Образец с выровненными опорными гранями и с установленными на нем рамками и тензодатчиками (для призм) устанавливаются на нижнюю опорную плиту пресса и центрируют. Центрирование производится при помощи прибора для центровки образцов (рисунок 10) [19].



1 – плита пресса, 2 – образец, 3 – угольник, 4 – основание приспособления, 5 – шток, 6 – гнезда для установки ограничителя, 7 – ограничитель, 8 – направляющие, 9 – крепежные болты

Рисунок 10 – Приспособление для центрирования контрольных образцов по ГОСТ 10180-2012

Для выравнивания опорных участков поверхностей образцов использовалась быстротвердеющая смесь – гипс, толщина смеси не превышала 5 мм.

После установки образца, верхнюю плиту пресса вплотную совмещали с верхней плоскостью образца.

Образец нагружали постепенно. По плану нагрузку увеличивали через каждую минуту, до тех пор, пока образец не достиг разрушения. Фактический шаг нагружения – 10 тонн.

Получаемые в процессе проведения испытаний показания отсчетов по тензодатчикам и сроки проведения заносились в журнал испытаний по ГОСТ 24452-80.

Внешний вид образца-куба и образца-призмы до и после испытания показаны на рисунках 11 и 12.

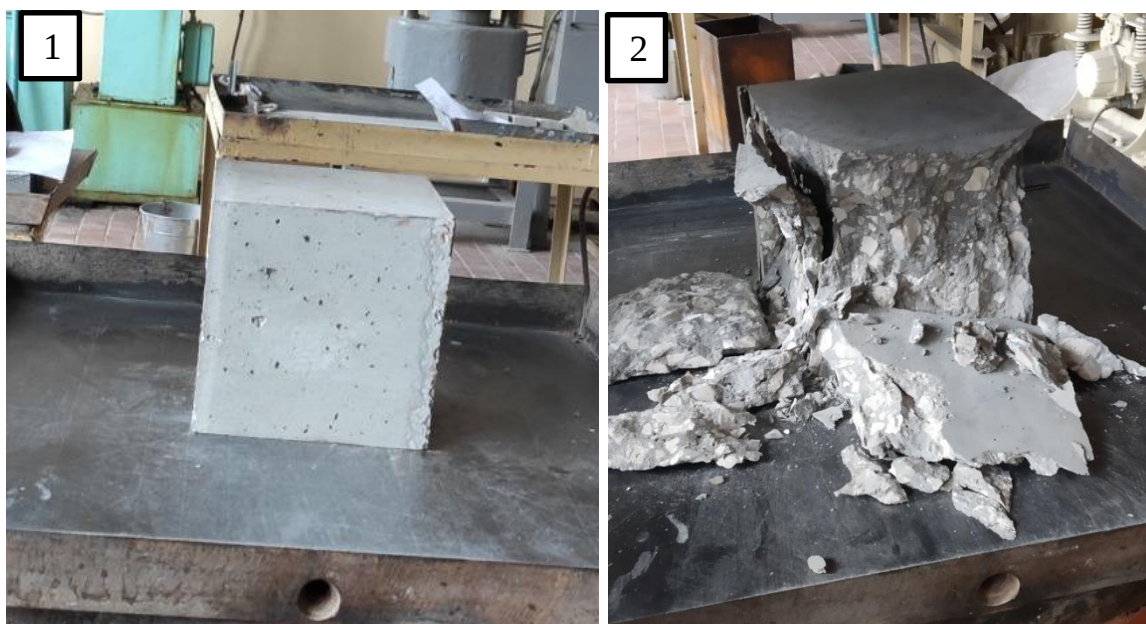


Рисунок 11 – Образец-куб до (1) и после (2) испытания



Рисунок 12 – Образец-призма до (1) и после (2) испытания

Результаты статистической обработки данных представлены в таблицах 5-6.

Таблица 5 – Основные характеристики опытных кубов

Марка образца	Разрушающая нагрузка, R_p , Н	Кубиковая прочность, $R_{пр}$, МПа	Расчетный класс бетона, при коэффициенте 0,8
К1к	1130000	50,22	39,10
К2к	1320000	58,67	45,68
К3э	1465000	65,11	50,70
К4э	1410000	62,67	48,79

Таблица 6 – Основные характеристики опытных призм

Марка образца	Разрушающая нагрузка, R_p , Н	Площадь сечения $F_{полн}$, мм ²	Призменная прочность, $R_{пр}$, МПа	Модуль упругости E_b , МПа	E_b норм. по для проектного класса бетона, МПа
П1к	1095000	22500	48,67	35454,82	27500
П2к	1097500		48,78	35643,97	
П3э	1150000		51,11	33063,79	
П4э	1137500		50,56	34331,53	

Второй этап заключается в исследовании балок двух серий по два образца из классического и экспериментального бетона. Вначале образцы каждой партии осматривались на наличие дефектов. Для точности фиксирования появления трещин и дальнейший рост. Все исследуемые балки [46, 47] до проведения испытаний красились водно-дисперсной эмульсией. После окраски определялся фактический размер (таблица 7, рисунок 13), образцов-балок после визуального осмотра.

Таблица 7 – Фактические размеры экспериментальных образцов

Балка №1 (Б10к) бетон классический с арматурой Ø10									
Разрез 1-1		Разрез 2-2		Разрез 3-3		Разрез 4-4		Вид А, Б	
наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h_1	134	h_3	134	h_5	134	l_1	1530	c_1	19
h_2	138	h_4	138	h_6	138	l_2	1580	c_2	20
b_1	120	b_3	120	b_5	120	–	–	c_3	21
b_2	118	b_4	118	b_6	119	–	–	c_4	21
Балка №2 (Б10э) бетон экспериментальный с арматурой Ø10									
Разрез 1-1		Разрез 2-2		Разрез 3-3		Разрез 4-4		Вид А, Б	
наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение
h_1	139	h_3	139	h_5	139	l_1	1560	c_1	35
h_2	141	h_4	141	h_6	141	l_2	1580	c_2	35
b_1	121	b_3	116	b_5	120	–	–	c_3	25
b_2	123	b_4	119	b_6	121	–	–	c_4	23

Продолжение таблицы 7

Балка №3 (Б8к) бетон классический с арматурой Ø8									
Разрез 1-1		Разрез 2-2		Разрез 3-3		Разрез 4-4		Вид А, Б	
наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение
h_1	136	h_3	136	h_5	136	l_1	1558	c_1	15
h_2	139	h_4	139	h_6	139	l_2	1575	c_2	20
b_1	120	b_3	118	b_5	121	—	—	c_3	30
b_2	120	b_4	119	b_6	119	—	—	c_4	30

Балка №4 (Б8э) бетон экспериментальный с арматурой Ø8									
Разрез 1-1		Разрез 2-2		Разрез 3-3		Разрез 4-4		Вид А, Б	
наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение	наименование	значение
h_1	140	h_3	143	h_5	136	l_1	1560	c_1	25
h_2	136	h_4	140	h_6	139	l_2	1577	c_2	27
b_1	120	b_3	121	b_5	122	—	—	c_3	25
b_2	123	b_4	122	b_6	120	—	—	c_4	25

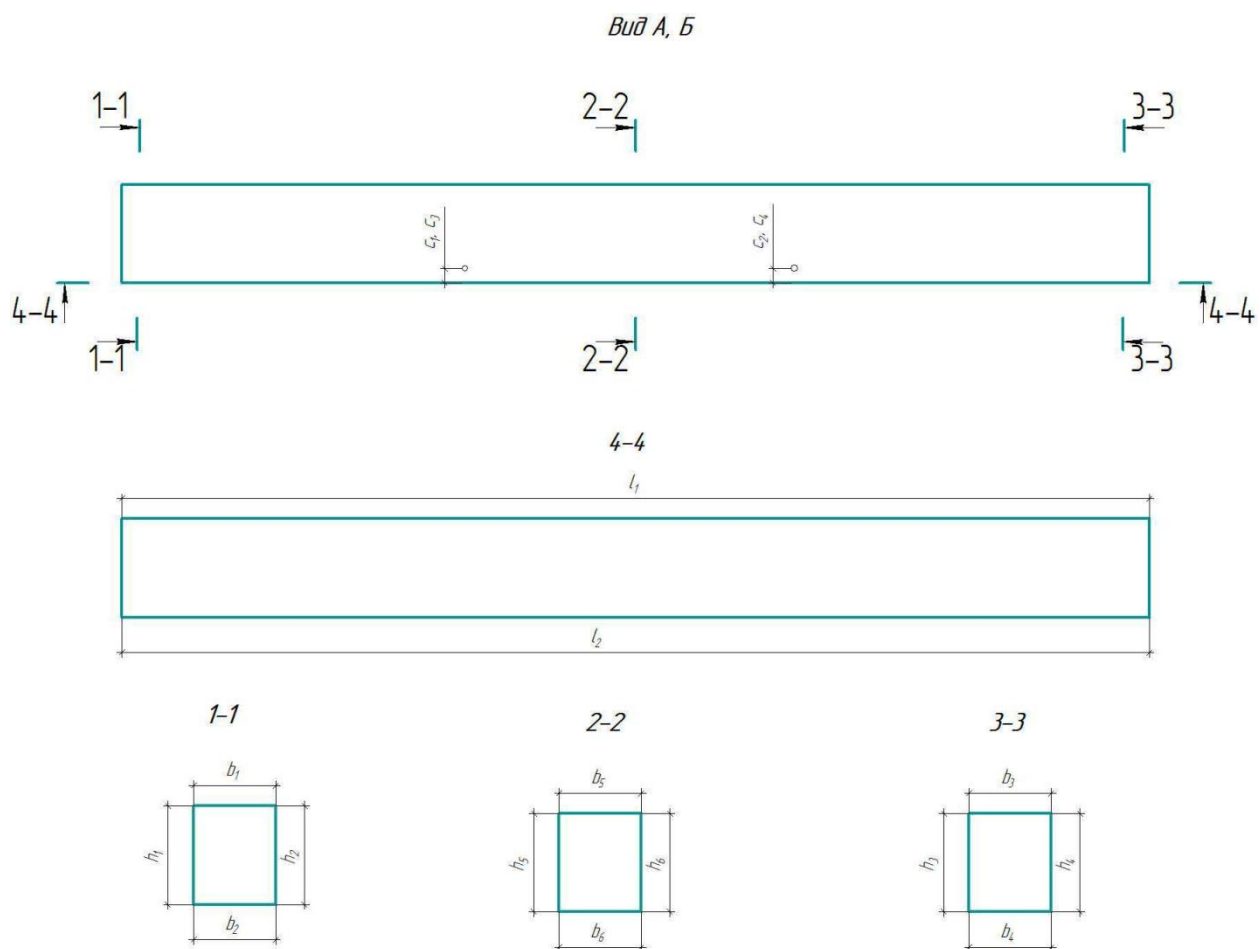


Рисунок 13 – Схема размеров опытных образцов балок

Установка исследуемой балки производилась на испытательный стенд вручную. До установки приборов балка выверялась относительно центрального положения установки и производилась разметка для приборов. Посредством гипсового раствора прикреплялись стальные пластины размером $5 \times 120 \times 100$ мм с цилиндрами к нижним крайним опорным участкам под скобы верхней траверсы экспериментального стенда. Цилиндры являлись шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опорами. Далее происходила последовательная установка измерительных приборов на основании схемы (рисунок 9): тензометры Гугенбергера, прогибомеры Аистова на тяжи с противовесом, мессура и домкрат с индикаторами часового типа. Подготовленная и испытанная исследуемая балка, приведены на рисунке 14.





Рисунок 14 – Общий вид исследуемой балки до (1) и после (2) испытания

Проведение эксперимента исследуемого образца-балки производилось в присутствии руководителя и по всем правилам техники безопасности.

До появления первых трещин шаг нагружения составлял около 5 процентов, а после образования трещин нагрузка была увеличена до 10 процентов от расчетной разрушающей нагрузки. Количество шагов нагружения балок-образцов составило от 22 до 45. Выдержка каждого шага приложенной нагрузки составила 3 минуты, увеличение нагрузки на 10 процентов происходило после 5 шага. Опрос измерений по всем установленным приборам производился в конце каждого шага. Дублирующие линии формы трещин на поверхности бетона наносились рядом с фактической трещиной, с указанием шага её появления, определяющие характер развития трещин рисунок 15.



Рисунок 15 – Трещины и ширина их раскрытия

За разрушение испытуемых балок принималась величина изгибающего момента, при котором усредненные по двум мессурам значения относительных деформаций продольной арматуры в растянутой зоны достигали 200×10^5 , что соответствует физическому пределу текучести стальной арматуры класса А400. После достижения указанных значений в арматуре растянутой зоны отмечался интенсивный прирост деформаций по всем установленным приборам на каждом шаге приращения нагрузки, что характерно для пластического характера разрушения изгибаемых элементов.

После разрушения исследуемых балок выполнялись следующие необходимые мероприятия:

- проведение визуального осмотра для выявления сколов и локальных разрушений;
- установка характера разрушения балок;
- фиксирование трещин;
- производство демонтажа всех приборов;
- фиксирование фотоаппаратом трещин и разрушений.

Демонтирование исследуемой балки производилось по окончании испытания, затем с сохранением одной и той же операционной последовательности проводились испытания последующих балок.

Выводы по второй главе

По поставленным задачам были выполнены следующие мероприятия:

- разработана программа экспериментальных исследований опытных образцов;
- подготовлены схемы армирования опытных балок с последующей передачей на завод-изготовитель;
- изготовлены бетонные кубы, призмы, железобетонные балки заводом-изготовителем с последующей транспортировкой в лабораторию Тольяттинского государственного университета;
- пройден инструктаж по технике безопасности;
- подготовлены опытные образцы для последующего испытания (окраска, зачеканка, маркировка, установка приборов измерения и крепления) согласно схеме расположения приборов;
- проведены испытание кубов, призм, балок с занесением полученных результатов испытаний в журнал проведения испытаний для последующего анализа данных.

Глава 3 Обработка результатов экспериментальных исследований исследуемых образцов

Изготовление бетонов должно обеспечивать соответствующие технические показатели, предусмотренные нормативными документами и проектной документацией. Одновременно производители бетона заинтересованы в периодическом пересмотре норм расхода материалов и сокращении использования цемента, как наиболее дорогостоящего компонента бетонной смеси, без потерь прочности бетона и при обеспечении несущей способности, жесткости и трещиностойкости изделий и конструкций. В связи с этим проведение исследовательских задач по подбору оптимальных составов бетонов и выполнение сопутствующих лабораторных испытаний образцов для контроля прочностных и деформативных показателей материалов и изделий является актуальной для большинства заводов ЖБИ.

3.1 Метод расчета на прочность и модуль упругости контрольных образцов

Проведение испытаний стандартных контрольных образцов по определению прочности бетона выступает первостепенным параметром перед испытаниями образцов-балок, изготовленных из экспериментального и классического составов. Все стандартные контрольные образцы испытаны в соответствии с ГОСТ 10180-2012.

При этом кубиковая прочность бетона R_k определяется по величине наибольшей нагрузки, поделенной на площадь поперечного рабочего сечения образца и обозначается формулой (1):

$$R_{\kappa} = \alpha \frac{P}{A}, \quad (1)$$

где P – разрушающая нагрузка, кН;

A – площадь рабочего поперечного сечения образца, см²;

α – масштабный коэффициент, зависящий от размера куба ($\alpha = 1$ при $\alpha = 150$ мм).

Кубиковая прочность бетона принимается равной средней по результатам двух образцов. Разрушающее усилие фиксируется по силоизмерителю прессы с точностью, равной цене деления шкалы. Обработанные результаты полученных данных заносятся в таблицу 8.

Таблица 8 – Кубиковая прочность контрольных образцов

Поз.	Марка образца	Разрушающая нагрузка (P_p , т)	Площадь (F , м)	Кубиковая прочность (R_{κ} , т/м)
1	K1к	113	0,405	279,01
2	K3к	132		325,92
3	K2э	146,5		361,73
4	K4э	141		348,15

Вычисление призмочной прочности для каждого образца идет по формуле:

$$R_{np} = \frac{P_p}{F}, \quad (2)$$

где P_p – разрушающая нагрузка, измеренная по шкале силоизмерителя прессы (машины);

F – среднее значение площади поперечного сечения, образца, определяемое по его линейным размерам.

Модуль упругости вычисляют для каждого образца при уровне нагрузки, составляющей 30 процентов от разрушающей, по формуле:

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}}, \quad (3)$$

где $\sigma_1 = P_p / F$ – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30 процентов от разрушающей;

P_1 – соответствующее приращение внешней нагрузки;

ξ_{1y} – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $P_1 = 0,3 \cdot P_p$ и замеренное в начале каждой ступени ее приложения, которое определяют по п. 4.

В пределах ступени нагружения деформации определяют по линейной интерполяции.

Коэффициент Пуассона бетона вычисляют для каждого образца при уровне нагрузки, составляющей 30 процентов разрушающей, по формуле:

$$\mu = \frac{\varepsilon_{2y}}{\varepsilon_{1y}}, \quad (4)$$

где ε_{2y} – приращение упругомгновенной относительной поперечной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки $P_1 = 0,3 \cdot P_p$ и измеренное в начале каждой ступени ее приложения, которое определяют по формулам 5, 6.

Значения ε_{1y} и ε_{2y} определяют по формулам:

$$\varepsilon_{1y} = \varepsilon_1 - \Sigma \varepsilon_{1n}; \quad (5)$$

$$\varepsilon_{2y} = \varepsilon_2 - \Sigma \varepsilon_{2n}, \quad (6)$$

где ε_{1y} и ε_{2y} – приращения полных относительных продольных и поперечных деформаций образца, соответствующие уровню нагрузки $P_1 = 0,3 \cdot P_p$ и замеренные в конце ступени ее приложения;

$\Sigma \varepsilon_{1n}$ и $\Sigma \varepsilon_{2n}$ – приращения относительных продольных и поперечных деформаций быстронатекающей ползучести, полученные при выдержках нагрузки на ступенях нагружения до уровня нагрузки $P_1 = 0,3 \cdot P_p$.

Приращения относительных продольных и поперечных деформаций [29] вычисляют как среднее арифметическое показаний приборов по четырем граням призмы или трем-четырем образующим цилиндра.

Значения относительных деформаций и определяют по формулам:

$$\varepsilon_1 = \Delta l_1 / l_1; \quad (7)$$

$$\varepsilon_2 = \Delta l_2 / l_2, \quad (8)$$

где Δl_1 , Δl_2 – абсолютные приращения продольной и поперечной деформаций образца, вызванные соответствующим приращением напряжений;

l_1 , l_2 – фиксированные базы измерения продольной и поперечной деформации образца.

Обработанные результаты полученных данных заносятся в таблицу 9.

Таблица 9 – Призменная прочность и модуль упругости контрольных образцов

Поз.	Марка образца	Разрушающая нагрузка (R_p , Н)	Площадь (F , мм ²)	Призменная прочность ($R_{пр}$, МПа)	Модуль упругости E_b
1	П1к	$109,5 \times 10^4$	22500	48,67	35454,82
2	П3к	$109,75 \times 10^4$		48,78	35643,97
3	П2э	115×10^4		51,11	33063,79
4	П4э	$113,75 \times 10^4$		50,56	34331,53

Использование тензорезисторов и других аналогичных приборов, шкалы которых должны быть проградуированы в относительных единицах деформаций, величины и определяют непосредственно по шкалам измерительных приборов.

В результате лабораторных испытаний бетонных кубов и призм получены следующие сравнительные показатели:

– средняя фактическая кубиковая прочность для бетона серии «К» составляет 54,4 МПа, а для серии «Э» – 63,9 МПа;

– средняя призменная прочность для бетона серии «К» – 48,7 МПа и серии «Э» – 50,8 МПа и значения модуля упругости соответственно 35550 и 33700 МПа.

При большей прочности бетона экспериментального состава материал получен с меньшим модулем упругости. Снижение характеризуется незначительной величиной в 5 процентов, что в целом не является существенным для такого материала как бетон.

3.2 Метод расчета прочности нормального сечения железобетонных исследуемых балок

Определить необходимость усиления железобетонного элемента можно проверив несущую способность нормального сечения к продольной оси элемента. Рассмотрим упрощенный алгоритм действий.

Определяется граничное значение относительно сжатой зоны, по формуле:

где ξ_{sel} – относительная деформация арматуры, при напряжениях равных R_s ($\xi_{sel} = \frac{R_s}{E_s}$);

ξ_{b2} – относительная деформация сжатого бетона, при напряжениях равных R_b , принимается при относительной влажности воздуха от 40 процентов до 75 процентов $\rightarrow \xi_{b2} = 4,8 \cdot 10^{-3}$.

Определяется высота сжатой зоны бетона, по формуле:

(10)

Определяется момент предельного изгиба (M_{ult}), при $X \leq \xi_R \cdot h_0$, по формуле:

$$M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x \cdot (h_0 - \frac{x}{2}) + R_{sc} \cdot A'_s \cdot (h_0 - a'), \quad (11)$$

Обработанные результаты полученных данных заносятся в таблицу 10, графическая часть приведена на рисунке 16.

Таблица 10 – Результаты расчетов несущей способности исследуемых балок

Поз.	Маркировка образца	Mult, кН×м	X, м	ξ
1	Б8к	3,75	0,584	0,052
2	Б8э	3,74	0,558	0,050
3	Б10к	5,95	0,917	0,079
4	Б10э	5,64	0,867	0,079

Произведен расчет прочности нормального сечения железобетонного элемента к продольной оси. По результатам полученных данных выявлено, что момент предельного изгибающего момента и высота сжатой зоны в каждой серии (по диаметру арматуры) изменения незначительны, составляют менее 1 процента.

3.3 Расчет деформационной модели исследуемых железобетонных балок

Усилия в сечении при расчете по прочности и деформативности, нормальном к продольной оси элемента, определяют на основе нелинейной деформационной модели [47], использующей уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в сечении элемента, а также следующие положения:

- распределение относительных деформаций бетона и арматуры по высоте сечения элемента принимают по линейному закону (гипотезе плоских сечений);

- для элементов с трещинами эта гипотеза применяется для средних деформаций элемента на участках между трещинами;

- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями бетона и арматуры принимают в виде диаграмм состояния (деформирования) бетона и арматуры [2];

– сопротивление бетона растянутой зоны после появления трещин не учитывается, принимая при $\varepsilon_{bi} \geq 0$ напряжения $\sigma_{bi} = 0$. Сопротивление бетона растяжению также не учитывается при определении прочности элементов. Однако, в отдельных случаях (например, изгибаемые и внецентренно сжатые бетонные конструкции, в которых не допускают трещины) расчет по прочности производят с учетом работы растянутого бетона;

– переход от эпюры напряжений в бетоне к обобщенным внутренним усилиям определяют с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению. Для этого нормальное сечение условно разделяют на малые участки $i (i=1,2,...)$: при косом внецентренном сжатии (растяжении) и косом изгибе – по высоте и ширине сечения;

– при внецентренном сжатии (растяжении) и изгибе в плоскости оси симметрии поперечного сечения элемента – только по высоте сечения;

– напряжения в пределах малых участков i принимают равномерно распределенными (усредненными);

– каждый арматурный стержень выделяется индексом $j (j=1,2,...)$ или $i (i=1,2,...)$;

– индексом i обозначаются стержни, расположенные в части сечения без трещин, а индексом j – стержни, расположенные в части сечения с трещиной [29].

При расчете элементов с использованием деформационной модели принимают:

– значения сжимающей продольной силы, а также сжимающих напряжений и деформаций укорочения бетона и арматуры со знаком «минус»;

– значения растягивающей продольной силы, а также растягивающих напряжений и деформаций удлинения бетона и арматуры со знаком «плюс».

Знаки координат центров тяжести арматурных стержней и выделенных

участков бетона, а также точки приложения продольной силы принимают в соответствии с назначенной системой координат XOY (для примера на рисунке 16 приведены положительные значения координат i -го участка бетона: Z_{bxi} , Z_{byi} и j -го арматурного стержня: Z_{sxi} , Z_{syi}). В общем случае начало координат этой системы (точка 0 на рисунке 17) может располагаться в произвольном месте в пределах поперечного сечения элемента, хотя для унификации расчета в линейной и нелинейной стадии деформирования [28] элемента начало координат назначают в центре тяжести сечения при упругой стадии деформирования элемента.

При расчете конструкций по первой группе предельных состояний [4, 5, 41] используют расчетные диаграммы арматуры и бетона, а при расчете конструкций по второй группе предельных состояний – нормативные диаграммы. Диаграммы представлены в разделе 3.4.

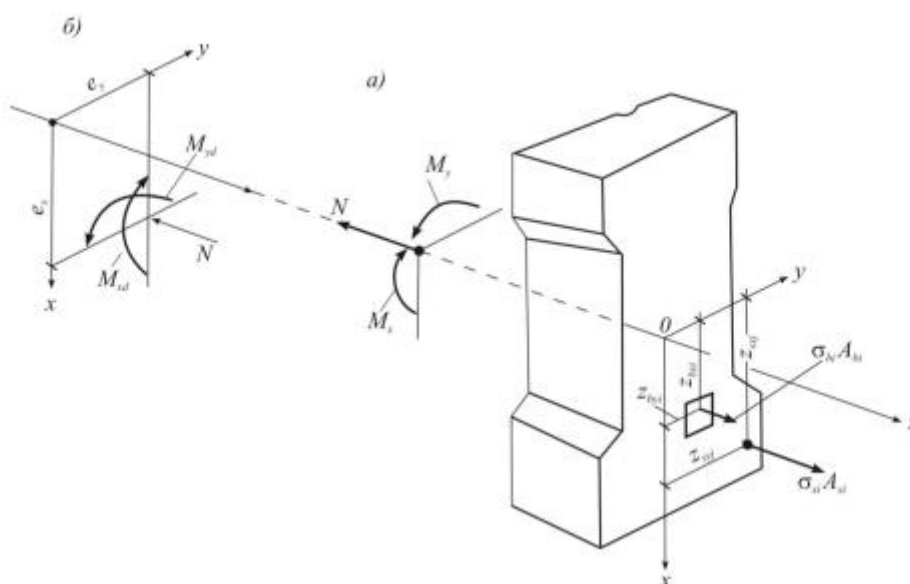


Рисунок 16 – Схема железобетонного элемента нормального сечения по СП 63.13330.2018

При расчете нормальных сечений по прочности и деформативности в общем случае (рисунок 16) используют:

– уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в нормальном сечении элемента:

$$\begin{aligned} M_x &= \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} \cdot Z_{bxi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} \cdot Z_{sxj} ; \\ N &= \sum_i \sigma_{bi} \cdot A_{bi} + \sum_j \sigma_{sj} \cdot A_{sj} , \end{aligned} \quad (12)$$

где M_x – изгибающий момент от внешней нагрузки;

N – продольная сила от внешней нагрузки;

$\sigma_{bi}, A_{bi}, z_{bxi}$ – напряжения на уровне центра тяжести i -го участка сечения, его площадь и координата относительной оси;

$\sigma_{sj}, A_{sj}, z_{sxj}$ – напряжения на уровне центра тяжести j -го участка сечения, его площадь и координата относительной оси.

– уравнения, определяющие распределение деформаций по сечению элемента (в бетоне ε_{bi} и арматуре ε_{sj}):

$$\varepsilon_{bi} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot z_{bxi} ; \quad (13)$$

$$\varepsilon_{sj} = \varepsilon_0 + \frac{1}{r_x} \cdot z_{sxj} , \quad (14)$$

где ε_0 – относительные деформации волокна на уровне расположенного на пересечении выбранных осей (в точке 0);

$\frac{1}{r_x}$ – кривизна продольной оси в плоскости действия изгибающего

момента M_x .

– зависимости, связывающие напряжения и относительные деформации бетона и арматуры:

$$\sigma_{bi} = E_b \cdot \nu_{bi} \cdot \varepsilon_{bi}; \quad (15)$$

$$\sigma_{sj} = E_s \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}, \quad (16)$$

где ν_{bi} – коэффициент секущего модуля деформации бетона для i -го участка, зависящий от вида расчетов (по прочности, по деформациям на кратковременное или длительное действие нагрузки);

ν_{sj} – коэффициент секущего модуля деформации арматуры для j -го стержня, расположенного в сечении с трещиной;

ν_{si} – коэффициент секущего модуля арматуры для сечения без трещин;

E_b – начальный модуль упругости бетона;

E_s – модуль упругости стержня арматуры.

В уравнениях равновесия (12) изгибающий момент M_x от внешней нагрузки относительно выбранных и располагаемых в пределах поперечного сечения элемента координатных осей (соответственно действующих в плоскостях XOZ или параллельно им), если внешняя нагрузка в виде моментов M_{xd} и нормальной силы N приложена с эксцентриситетами e_x относительно выбранных осей, то ее действие приводится к моментам M_x и нормальной силе относительно выбранной системы координат (рисунок 16) по формулам:

$$M_x = M_{xd} + N \cdot e_x; \quad (17)$$

$$\frac{1}{r_x} = \frac{-d^2 f_x}{dz^2}; \varepsilon_0 = \frac{du}{dz}, \quad (18)$$

где f_x – прогибы стержня по направлению оси x ;

u – горизонтальные перемещения стержня вдоль оси Z .

Для железобетонных элементов, на которые действуют изгибающие моменты двух направлений и продольная сила (рисунок 16), связь их с кривизной и относительным удлинением на уровне оси Z представляется физическими соотношениями вида:

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{12} \cdot \varepsilon_0; \quad (19)$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{23} \cdot \varepsilon_0$$

Жесткостные характеристики D_{ij} ($i, j = 1, 2, 3$) нормального сечения железобетонного элемента определяют по формулам:

$$\begin{aligned} D_{11} &= \sum_i A_{bi} \cdot Z_{bxi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_i A_{si} \cdot Z_{sxi}^2 \cdot E_{si} \cdot \nu_{si} \\ D_{22} &= \sum_i A_{bi} \cdot Z_{byi}^2 \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_i A_{si} \cdot Z_{syi}^2 \cdot E_{si} \cdot \nu_{si} \\ D_{12} &= \sum_i A_{bi} \cdot Z_{bxi} \cdot Z_{byi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_i A_{si} \cdot Z_{sxi} \cdot Z_{syi} \cdot E_{si} \cdot \nu_{si} \\ D_{13} &= \sum_i A_{bi} \cdot Z_{bxi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_i A_{si} \cdot Z_{sxi} \cdot E_{si} \cdot \nu_{si} \\ D_{23} &= \sum_i A_{bi} \cdot Z_{byi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_i A_{si} \cdot Z_{syi} \cdot E_{si} \cdot \nu_{si} \\ D_{33} &= \sum_i A_{bi} \cdot E_b \cdot \nu_{bi} + \sum_i A_{si} \cdot E_{si} \cdot \nu_{si} \end{aligned} \quad (20)$$

Координаты центра тяжести в осях x, y, z определяются по формулам

$$Z_{cx} = \frac{D_{13}}{D_{33}}; Z_{cy} = \frac{D_{23}}{D_{33}}, \quad (21)$$

где величины Z_{cx}, Z_{cy} могут быть как положительными, так и отрицательными.

Поместив начало координат x, y, z в точку центра тяжести путем параллельного переноса (эти центральные оси обозначим x^*, y^*, z^*), получаем запись системы в центральных осях:

$$\left. \begin{aligned} M_x^* &= D_{11}^* \cdot \frac{1}{\rho_x}; \\ N &= D_{33}^* \cdot \varepsilon_0, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Где соблюдаются условия:

$$D_{13}^* = 0, D_{23}^* = 0; \quad (23)$$

$$\varepsilon_0^* = \varepsilon_0 + z_{cx} \cdot \frac{1}{\rho_x}; \quad (24)$$

$$M_x^* = M_x - N \cdot z_{cx} \quad (25)$$

Жесткости D_{ij}^* определяются по формулам (19), где величины Z_{bxi}, Z_{sxj} определяются относительно центральных осей.

Для железобетонных элементов, на которые действуют только изгибающие моменты двух направлений M_x (косой изгиб), в уравнении (18) принимают $N=0$.

Для внецентренно сжатых в плоскости симметрии поперечного сечения железобетонных элементов и расположении оси X в этой плоскости принимают $M_y=0$ и $D_{12}=D_{23}=0$. В этом случае физические уравнения имеют вид:

$$M_x = D_{11} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{13} \cdot \varepsilon_0;$$

$$N = D_{13} \cdot \frac{1}{r_x} + D_{33} \cdot \varepsilon_0, \quad (26)$$

При этом сечение разделяется на слои, нормальные к оси симметрии x .
В осях симметрии x^*oz^* , $D_{13} = 0$ и система (26) упрощается

$$M_x^* = D_{11}^* \cdot \frac{1}{r_x}; N = D_{33}^* \cdot \varepsilon_0, \quad (27)$$

При равенстве нулю нормальной силы.

$$M_x^* = D_{11}^* \cdot \frac{1}{r_x}; \varepsilon_0 = 0, \quad (28)$$

Напряжения в любом бетонном слое и арматурном стержне определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{bi} &= \frac{M_x \cdot Z_{bi} \cdot E_{bi} \cdot \nu_{bi}}{D_{11}^*}, \\ \sigma_{bj} &= \frac{M_x \cdot Z_{sj} \cdot E_{sj} \cdot \nu_{sj}}{D_{11}^*}, \end{aligned} \quad (29)$$

Для нижнего или верхнего наиболее растянутого слоя.

$$D_{11}^* / Z_{bi} \cdot E_{bi} \cdot \nu_{bi} = W_{pl}, \quad (30)$$

где W_{pl} — упруго–пластический момент сопротивления сечения растяжению.

Полагая в (30) $\nu_{bi}=1; \nu_{sj}=1$, получают приведенный упругий момент сопротивления сечения W_{red} . Проведено 3 цикла расчетов для каждой серии балок до установки факта разрушения элемента. Весь алгоритм расчетов произведен в программе Microsoft Office Excel. Для сравнения полученных результатов расчетного определения предельного изгибающего момента сведено в таблицу 11.

Таблица 11 – Результаты расчетов определения предельного изгибающего момента

Поз.	Метод расчета	Численное значение, кН×м				Разница с расчетом по предельным усилиям, %			
		Б10к	Б10э	Б8к	Б8э	Б10к	Б10э	Б8к	Б8э
1	По предельным усилиям	5,95	5,64	3,74	3,75	-	-	-	-
2	По нелинейной деформационной модели (двухлинейная диаграмма сжатого бетона)	6,06	4,76	3,40	3,34	1,85	-0,84	-0,91	-0,89
3	По нелинейной деформационной модели (трехлинейная диаграмма сжатого бетона)	6,73	5,17	4,12	4,07	1,13	0,92	1,1	1,08

Расхождение результатов, полученных по нелинейной деформационной модели, с результатами по методу предельного изгибающего момента достаточно невелики, что свидетельствует о правильности построенной модели. В ходе исследования было подтверждено, что в нелинейной деформационной модели при расчете по прочности допускается не учитывать работу растянутого бетона. Для описания напряженно-деформированного состояния сжатого бетона наиболее целесообразным является применение двухлинейной диаграммы, так как она проще в математическом описании, а разница в расчете по двухлинейной и трехлинейной диаграммам не столь велика.

3.4 Результаты испытаний исследуемых образцов

Все исследуемые образцы-балки в ходе испытания были доведены до разрушения. Самую большую нагрузку, выдержали образцы-балки из экспериментального бетона, и несущая способность оказалась выше, чем у образцов из классического бетона. Во всех образцах-балках прослеживался одинаковый характер разрушения: увеличение ширины и высоты нормальных трещин по всей длине, преимущественно в середине пролета, а также соотношение прогибов составило $1/57$ (рисунок 17).



Рисунок 17 – Внешний вид балки после разрушения

На всех этапах эксперимента в ходе исследования фиксировались изменения деформаций сжатой зоны бетона и растянутой зоны арматуры. Для арматуры с базой 300 мм осуществлялся контроль за величиной деформаций посредством механических приборов-индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм.

Оценка прочности, модуля упругости, прогибов (f), деформации бетона (ϵ_b) и деформации арматуры (ϵ_s) экспериментального состава бетона производилась посредством проведения испытаний опытных образцов (кубов, призм и балок) со стандартными размерами. Диаграммы

зависимостей прочности бетона на сжатие, прогиб, деформаций бетона и арматуры на изгиб, приведены в графиках на рисунках 18-19.

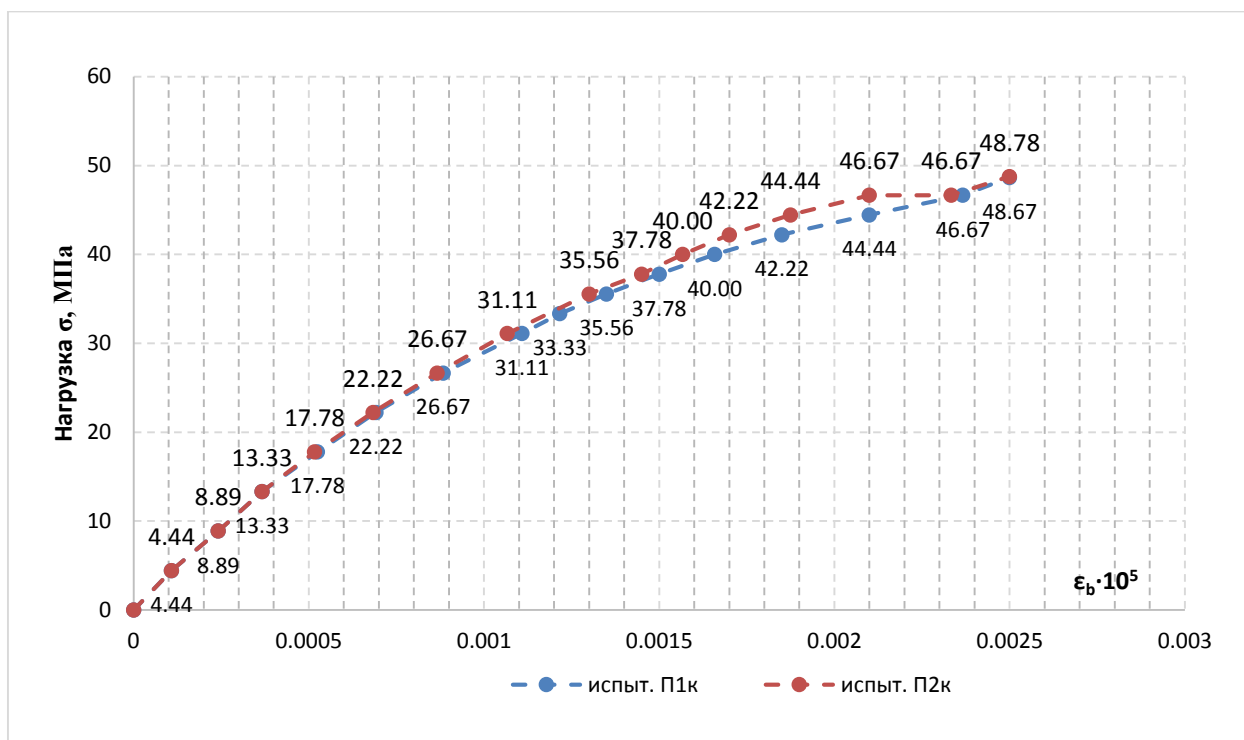


Рисунок 18 – Диаграммы деформирования бетона по прочности на сжатие для классического бетона

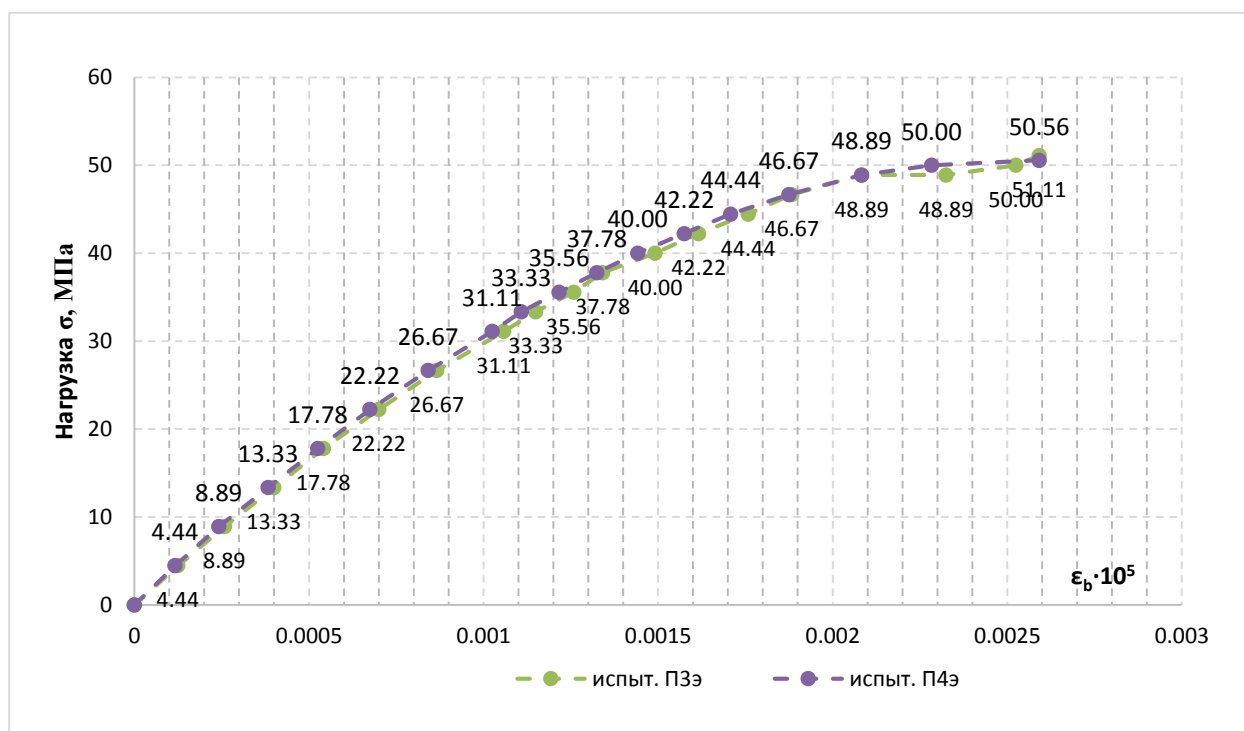
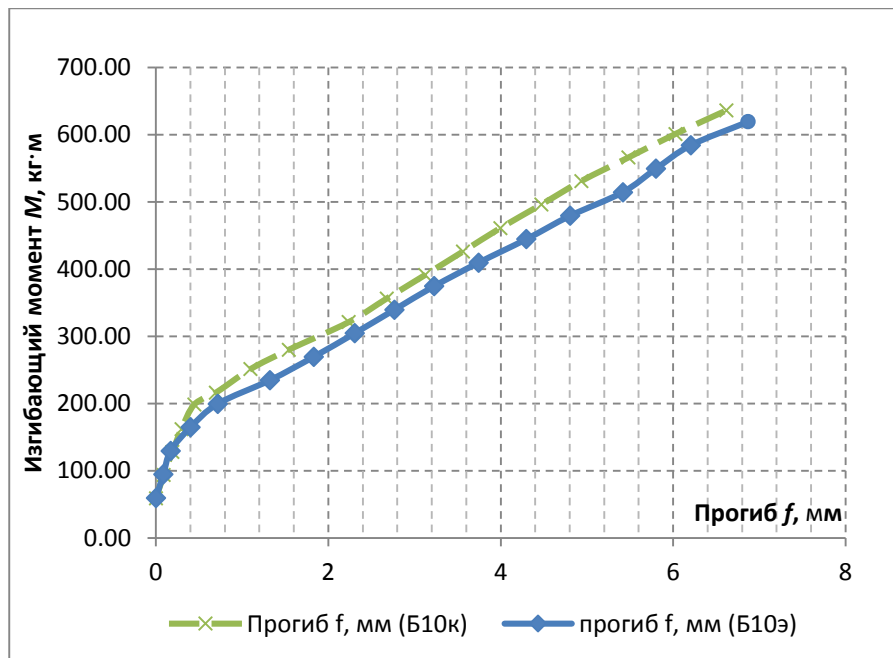


Рисунок 19 – Диаграммы деформирования бетона по прочности на сжатие для экспериментального бетона

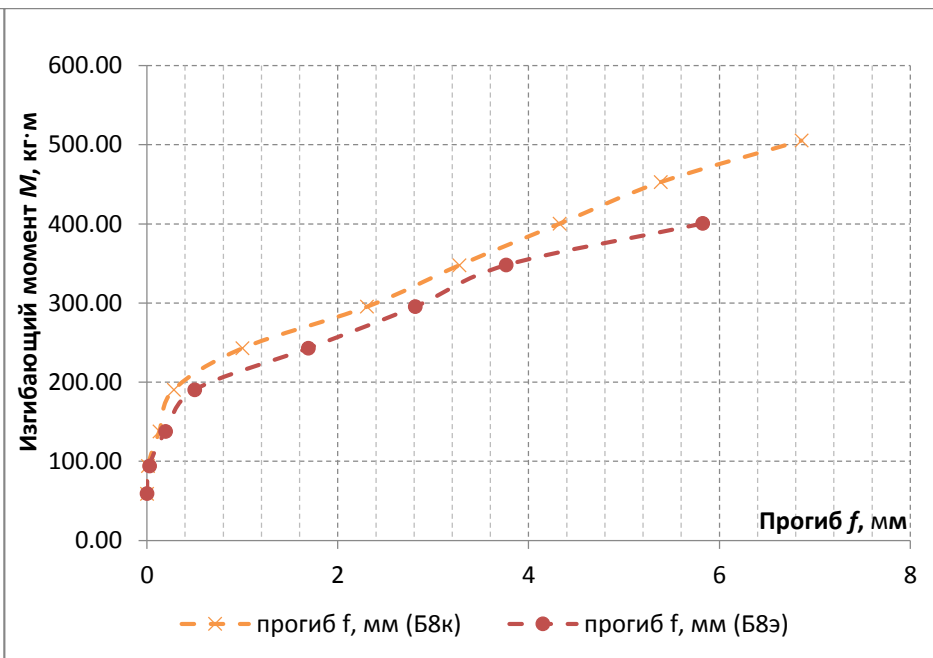
Проанализировав характер распределения деформирования арматуры и бетона на изгиб, а также величину прогибов с помощью прогибомеров Аистова, подготовлены диаграммы (рисунок 20), с учетом веса балки, как на начальных стадиях, так и на стадиях, предшествующих разрушению. Также подготовлены диаграммы экспериментальной [32] зависимости с отношением изгибающего момента к средним деформациям арматуры растянутой зоны (рисунок 21), при помощи мессур и индикаторов часового типа, и к деформациям бетона сжатой зоны (рисунок 22), при помощи тензометров Гугенбергера с учетом веса балки.

При испытании балок, вне зависимости от варианта армирования, получены данные, свидетельствующие о снижении прочности и повышении деформативности изгибаемых железобетонных элементов при использовании бетона экспериментального состава в сравнении с образцами из классического состава бетона.

а)



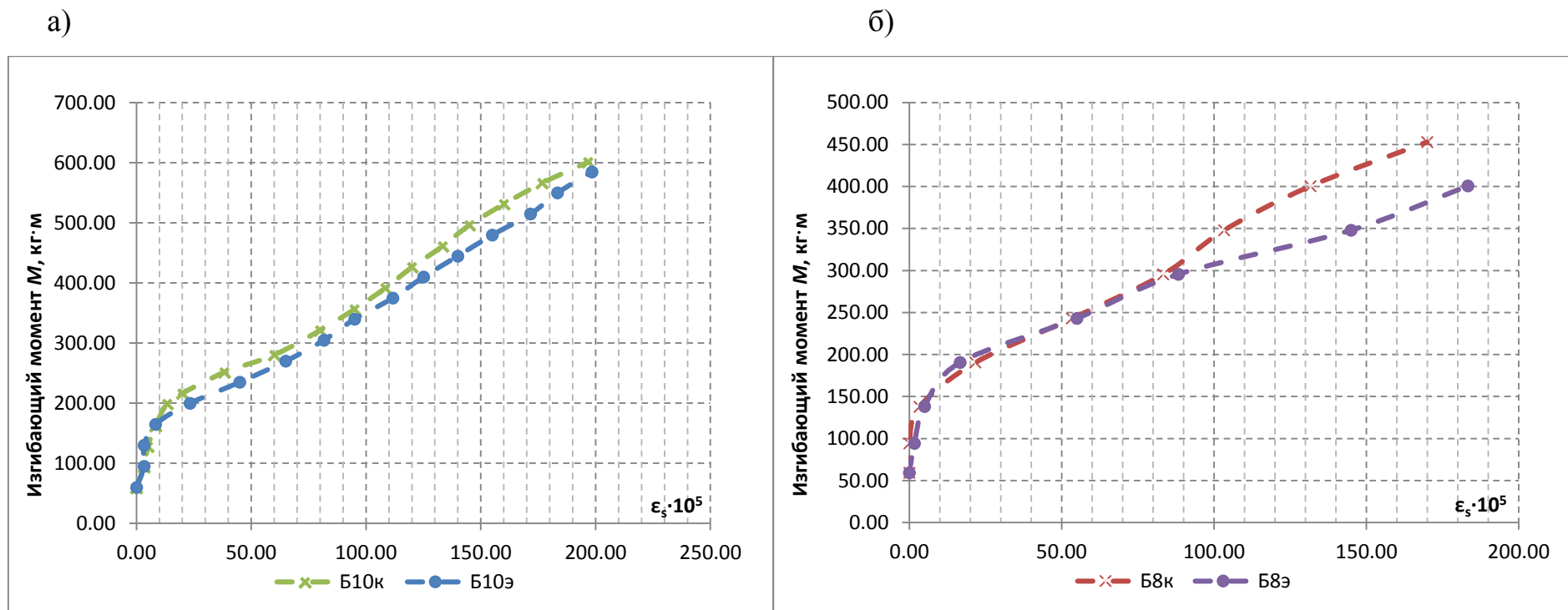
б)



× – опытные данные для балок из бетона классического состава;

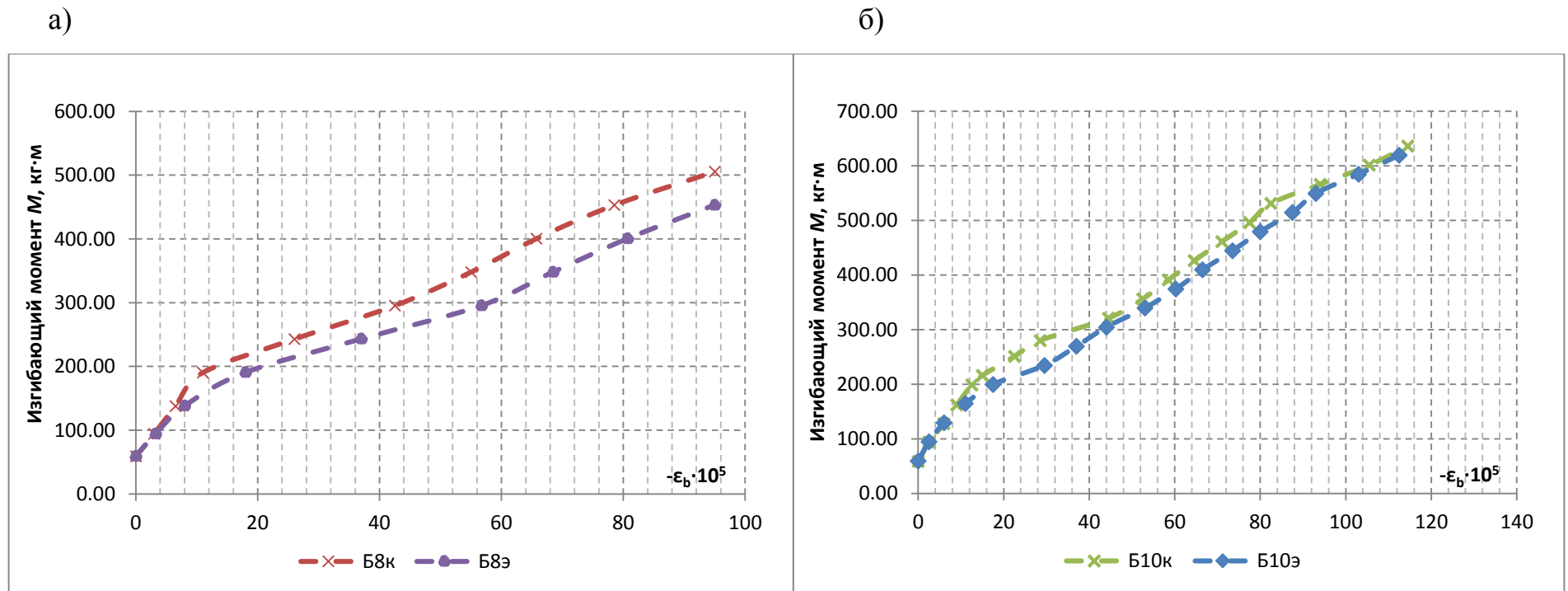
• – опытные данные для балок из бетона экспериментального состава

Рисунок 20 – Экспериментальная зависимость «изгибающий момент – прогиб» для балок Б10к, Б10э (а) и Б8к, Б8э (б)



- × — опытные данные для балок из бетона классического состава;
- — опытные данные для балок из бетона экспериментального состава

Рисунок 21 – Экспериментальная зависимость «изгибающий момент – средние деформации арматуры растянутой зоны» для балок Б10к, Б10э (а) и Б8к, Б8э (б)



× — опытные данные для балок из бетона классического состава;

• — опытные данные для балок из бетона экспериментального состава

Рисунок 22 – Экспериментальная зависимость «изгибающий момент – деформации бетона сжатой зоны» для балок Б10к, Б10э (а) и Б8к, Б8э (б)

Предельное значение изгибающего момента в балках Б8э и Б10э оказалось меньше, чем в балках Б8к и Б10к на 12 и 3 процента соответственно. При этом прогибы балок Б8э и Б8к, Б10э и Б10к, а также деформации бетона сжатой зоны в «балках-близнецах» при $\varepsilon_s=0,002$ отличаются несущественно (до 3 процентов).

Сравнительный анализ деформативности железобетонных балок рационально производить при равном изгибающем моменте меньше разрушающего. В данном исследовании сопоставление произведено при уровнях нагружения $0,6 \times M_{ult,k}$ и $0,8 \times M_{ult,k}$ (таблица 12), здесь $M_{ult,k}$ – экспериментальное значение изгибающего момента в балках из классического бетона (Б10к и Б8к) при $\varepsilon_s=0,002$.

Таблица 12 – Экспериментальные данные о деформациях опытных балок

Шифр образца-балки	Изгибающий момент М		Прогиб f		Деформации бетона в сжатой зоне $\varepsilon_b \times 10^5$		Средние деформации арматуры в растянутой зоне $\varepsilon_s \times 10^5$	
	кН·м	%	мм	%	без размерности	%	без размерности	%
При $M=M_{ult} (\varepsilon_s=0,002)$								
Б8к	4,82	100	6,16	100	86,6	100	200,0	100
Б8э	4,22	88	6,33	103	85,9	99	200,0	100
Б10к	6,07	100	6,13	100	107,0	100	200,0	100
Б10э	5,88	97	6,26	102	103,8	97	200,0	100
При $M=0,6 \times M_{ult,k}$								
Б8к	2,89	0,6	2,19	100	79,3	100	41,1	100
Б8э	2,89	0,68	2,67	122	83,8	106	53,5	130
Б10к	3,64	0,6	2,79	100	98,0	100	54,1	100
Б10э	3,64	0,62	3,09	111	106,7	109	58,0	107
При $M=0,8 \times M_{ult,k}$								
Б8к	3,86	0,8	4,07	100	-62,7	100	122,7	100
Б8э	3,86	0,91	5,15	127	-77,4	123	172,6	141
Б10к	4,86	0,8	4,33	100	-75,3	100	141,7	100
Б10э	4,86	0,83	4,91	113	-81,3	108	157,9	111

Так при уровне нагружения $0,6 \times M_{ult,k}$ в балке Б8э прогиб составил 122 процента по сравнению с балкой Б8к, деформации бетона и арматуры –

106 и 130 процентов соответственно. В балке Б10э прогиб превысил на 11 процентов значение в балке Б10к, деформации бетона и арматуры оказались больше на 9 и 7 процентов. При уровне нагружения $0,8 \times M_{ult}$, к в балке Б8э прогиб достиг 127 процентов по сравнению с прогибом балки Б8к, деформации бетона 123 процента, деформации арматуры 141 процентов. Прогиб балки Б10э превысил на 13 процентов значение в балке Б10к, деформации бетона и арматуры установлены больше на 8 и 11 процентов соответственно. Как видно, использование экспериментального состава бетона более существенно сказалось на снижении жесткости изгибаемого железобетонного элемента при меньшем проценте армирования на более высоком уровне нагружения.

Выводы по третьей главе

В результате разработанной программы проведения многофакторного исследования за счет проведения испытаний контрольных, эталонных и исследуемых образцов позволило определить основные параметры напряженно-деформированного состояния конструкций. Сравнение полученных результатов экспериментальных данных по кубиковой и призмной прочности, модуля упругости контрольных образцов, а также жесткости, трещиностойкости и деформативности железобетонных изгибаемых элементов позволило выявить характерные особенности экспериментального состава бетонной смеси.

Анализ данных при выдержке образцов в нормальных условиях более 80 суток, выявлен характер разрушения всех контрольных образцов (кубы, призмы), который происходит по обычной схеме и соответствует ГОСТ 10180-2012.

При выполнении вышеприведенных расчетов и проведения сравнительного анализа, были сделаны следующие выводы.

1. Призмная прочность исследуемого бетона значительно превышает ожидаемые значения по прочности на сжатие.

2. При экспериментальных исследованиях [44] образцов-призм полученный модуль упругости для экспериментального бетона составляет $E_{b3}=33,7 \times 10^3$ МПа, для классического бетона – $E_{bk}=35,5 \times 10^3$ МПа при проектном классе В20 соответственно, что превышает нормируемые показатели, составляющие $E_{b20}=27,5 \times 10^3$ МПа.

3. Полученные значения прочностных и деформативных показателей экспериментального бетона превышают нормируемые значения для проектного класса бетона, что позволяет обеспечить соблюдение требований расчетов по предельным состояниям при использовании в железобетонных конструкциях данного бетона взамен бетона классической рецептуры.

4. Прогибы балок на экспериментальном бетоне оказались выше, в связи с тем, что жесткость меньше при эксплуатационной нагрузке 60 процентов от разрушающей, разница составила для серии балок Б10 – 0,13 мм, а для серии балок Б8 – 0,35 мм.

5. Прочность при использовании экспериментального бетона оказалась ниже для серии балок Б10 на 4,6 процента, для серии балок Б8 на 11,8 процента в сравнении с классическим бетоном.

6. Момент трещинообразования для серии балок Б8 составил на 8 и 9 шаге нагружения, а для серии балок Б10 на 11 и 15 шаге нагружения.

Заключение

В данной магистерской диссертации выполнены поставленные задачи в соответствии с планом работ.

Учитывая полученные данные сделаны следующие выводы.

1. При более высокой прочности бетона получаем максимальный эффект от экономии цемента в экспериментальном составе. С повышением прочности в бетоне экспериментального состава модуль упругости в сравнении с классическим бетоном составляет на 5 процентов ниже, что характеризует как более деформативный состав бетона.

2. При уровне нагружения $0,6 \times M_{ult,k}$ в балке Б8э прогиб составил 122 процента по сравнению с балкой Б8к, деформации бетона и арматуры – 106 процентов и 130 процентов соответственно. В балке Б10э прогиб превысил на 11 процентов значение в балке Б10к, деформации бетона и арматуры оказались больше на 9 и 7 процентов. При уровне нагружения $0,8 \times M_{ult,k}$ в балке Б8э прогиб достиг 127 процентов по сравнению с прогибом балки Б8к, деформации бетона 123 процента, деформации арматуры 141 процент. Прогиб балки Б10э превысил на 13 процентов значения в балке Б10к, деформации бетона и арматуры установлены больше на 8 и 11 процентов соответственно.

3. Применение экспериментального состава при изготовлении железобетонных балок не выявило существенного и однозначного изменения момента трещинообразования в испытанных балках.

4. Оптимизация состава бетонной смеси производится за счет контроля прочностных показателей, по стандартным образцам-кубам недостаточна, также необходимо определение модуля упругости.

5. Комплексное многофакторное исследование бетонных и железобетонных образцов (кубы, призмы, балки) доказало обоснованность внесения изменений в рецептуру состава бетонной смеси, которые применяются в производстве и изготовлении железобетонных конструкций.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Астаева Ю. В., Хутова Е. Э. Определение призмной прочности и модуля упругости экспериментального бетона завода ЖБИ // Межвузовский международный конгресс. Высшая школа журнал: научные исследования – №1(2021). Раздел: Химические науки, Москва 2021. С. 99–104.

2. Беккиев М. Ю., Маилян Л. Р. Расчет изгибаемых железобетонных элементов различной формы поперечного сечения с учетом нисходящей ветви деформирования (методические разработки): сб. науч. тр. / КБАИ и РИСИ–Нальчик, 1985. 131 с.

3. Белякова Е. А., Москвин Р. Н., Тараканов О. В., Куимова Е. И., Утюгова Е. С. Зависимость свойств, затвердевших композиционных вяжущих от соотношения цемента и золы // Региональная архитектура и строительство № 2 (39). 2019. С. 20–26.

4. Блещик Н. П., Жуков Д. Д., Лазовский Д. Н., Казачек В. Г., Кондратчик А. А., Пецольд Т. М., Подобед Д. П., Рак Н. А., Тур В. В., Шуберт И. М. Железобетонные конструкции. Основы теории, расчета и конструирования. М.: БГТУ; Брест, 2003. 380 с.

5. Боровских А. В. Расчеты железобетонных конструкций по предельным состояниям и предельному равновесию. М.: Ассоциации строительных вузов; Москва; 2004. 320 с.

6. Гурьянова А. В., Хутова Е. Э. Диаграммный метод расчета на прочность с использованием нормативных характеристик состояния бетона и арматуры // Эксперт: теория и практика журнал, выпуск №6(9); Тольятти: 2020. С. 9–13.

7. Голышев А. Б., Бачинский В. Я., Полищук В. П. Железобетонные конструкции. Том I. Сопротивление железобетона, 2001. 419 с.

8. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования (ред. от 01.12.2019). Введ. 2013-07-01. М.: Стандартинформ,

2019. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200100938?section=status> (дата обращения: 09.03.2020).

9. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля (ред. от 01.02.2019). Введ. 2016-04-01. М.: Стандартинформ, 2016. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200124396?section=status> (дата обращения: 09.03.2020).

10. ГОСТ 17624-2012. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности (с Поправкой) (ред. от 01.06.2017). Введ. 2014-01-01. М.: Стандартинформ, 2014. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200101539?section=status> (дата обращения: 09.04.2020).

11. ГОСТ 18105-2010. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности (ред. от 01.08.2018). Введ. 2012-09-01. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200092221?section=status> (дата обращения: 15.02.2020).

12. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам (ред. от 01.06.2018). Введ. 2013-07-01. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200100908?section=status> (дата обращения: 23.12.2019).

13. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия (ред. от 01.02.2019). Введ. 2016-09-01. М.: Стандартинформ, 2019. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200133282?section=status> (дата обращения: 09.04.2020).

14. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия (ред. от 01.10.2012). Введ. 2012-10-01. М.: Стандартинформ, 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200093835?section=status> (дата обращения: 23.12.2019).

15. ГОСТ 13015-2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения (ред. от 01.12.2019). Введ. 2014-07-01. М.: Стандартинформ, 2019. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200101281?section=status> (дата обращения: 09.04.2020).

16. ГОСТ 8829-94. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости, официальное издание (ред. от 01.09.2019). М.: Госстрой России, ГУП ЦПП, 1997. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901704678?section=status> (дата обращения: 23.12.2019).

17. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия (ред. от 01.09.2019). Введ. 2012-01-01. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200085075?section=status> (дата обращения: 09.04.2020).

18. ГОСТ ИСО/МЭК 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий (с Поправкой) (ред. от 01.07.2018). Введ. 2012-01-01. М.: Стандартинформ, 2018. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200085223?section=status> (дата обращения: 23.12.2019).

19. Гучкин И. С. Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций: учеб. пособие. М.: АСВ, 2001. 176 с.

20. Давидюк А. Н. Прогресс в области бетона и железобетона – основной инструмент инновационного развития промышленности строительных материалов / Давидюк А. Н., д. тех. наук, заслуженный строитель РФ, директор НИИЖБ им. Гвоздева А. А. // Москва: XVII Международный строительный форум Цемент. Бетон. Сухие смеси 1, 2015.

21. Дворкин Л. И., Дворкин О. Л. Специальные бетоны. М.: Инфра-Инженерия, 2012.

22. Ерышев В. А. Диаграммный метод расчета стержневых железобетонных элементов : электронное учеб.–метод. пособие / ТГУ, Тольятти, 2019. 52 с.

23. Ерышев В. А. Методика расчета деформации бетона при режимных нагрузениях / монография: ТГУ, Тольятти, 2013. 150 с.

24. Калашников В. И., Тараканов О. В., Кузнецов Ю. С., Володин В. М., Беляков Е. А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто–порошковых смесей // Magazine of Civil Engineering, №8, 2012. 47–53 с.

25. Калашников В. И., Тараканов О. В. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения // Строительные материалы. № 1-2, 2017. 62–67 с.

26. Калашников В. И., Ерофеев В. Т., Тараканов О. В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство. № 4 (688), 2016. С. 30–37.

27. Карпенко Н. И., Соколов Б. С., Радайкин О. В. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // Строительство и реконструкция № 2, 2012. 11–19 с.

28. Магдеев У. Х., Морозов В. И., Пухаренко Ю. В. К построению теории деформирования дисперсно-армированного железобетона с высоким содержанием арматуры с трещинами / Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению архитектуры. градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2009 году, Т.2.: Москва-Иваново, 2010. 127–137 с.

29. Онуфриев Н. М. Сборно-монолитные железобетонные конструкции промышленных зданий // ЛИСИ. М.: Госстройиздат, 1963. 139 с.

30. Пересыпкин Е. Н., Шевцов С. В. Расчётные уравнения для нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с учётом

сопротивления бетона распространению трещин. Строительная механика и расчёт сооружений, № 3, 2010. 39–44 с.

31. Сигалов Э. Е., Стронгин С. Г. Железобетонные конструкции. Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, Москва, 1960. 387 с.

32. Соколов Б. С., Радайкин О. В. Диаграммные методы расчёта железобетонных конструкций. Пособие для подковки к лекционным и практическим занятиям // Казанск. гос. архитект – строит. ун-та, Казань, 2014, 65 с.

33. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения (ред. от 22.11.2019). М.: 2012. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554403082?section=status> (дата обращения: 09.04.2020).

34. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 (с Изменениями N 1, 2) (ред. от 22.11.2019). Введ. 2013-01-01. М.: Минрегион России, 2017. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456069587?section=status> (дата обращения: 09.12.2019).

35. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (ред. от 28.01.2019). М.: 2016. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456044318?section=status> (дата обращения: 09.04.2020).

36. Столяров Я. В. Теория железобетона на экспериментальной основе // Гостехиздат, 1986. 284 с.

37. Тошин Д. С., Хутова Е. Э., Астаева Ю. В. Комплексная оценка экспериментального бетона завода ЖБИ на кубах, призмах и железобетонных балках // Научно-технический журнал, Эксперт: теория и практика, №3 (12), Тольятти, 2021. С. 36–40.

38. Тошин Д. С., Хутова Е. Э., Астаева Ю. В. Прочность и жесткость железобетонных балок, изготовленных на экспериментальном бетоне завода

ЖБИ // Научно-технический журнал, Градостроительство и архитектура, Т.11, №1, Самара, 2021. С. 34–38.

39. Установка для испытания балочных конструкций Ерышев В. А., Колганов Ю. А., Горшенина Е. В. / Патент на изобретение RU2262698 С1, 20.10.2005, Заявка №2004120086/28 от 01.07.2004.

40. Хутова Е. Э. Многофакторное исследование прочности и деформативности экспериментального бетона завода ЖБИ для применения в изгибаемых элементах // сб. науч.-практич. конференции «Студенческие Дни науки в ТГУ», 2021.

41. Чаевская Е. А. Расчёт железобетонных конструкций по двум группам предельных состояний. учеб. пособие. М.: Братск, 2010. 68 с.

42. Flexural behavior investigation of steel-GFRP hybrid-reinforced concrete beams based on experimental and numerical methods, Engineering Structures, Volume 2020.

43. Flexural reinforced concrete elements normal section bearing capacity evaluation in fracture stage, Engineering Structures and Technologies, ISSN 2029-882X/eISSN 2029-8838, doi:10.3846/2029882X.2017.1322919, 2017. 70–78 с.

44. Flexural testing and analysis of full-strain-fields in sandwich composites. Marat-Mendes, R., Martins, R., Garcia, A., Reis, L., Flexural testing and analysis of full-strain-fields in sandwich composites, Frattura ed Integrità Strutturale, 2019.

45. Effect of concrete strength and longitudinal reinforcement arrangement on the performance of reinforced concrete beams strengthened using EBR and EBROG methods, Engineering Structures, 2020.

46. Experimental behaviour of steel-concrete composite box girders subject bending, shear and torsion, Engineering Structures, 2020.

47. Verification of the reinforced concrete beam model based on the results of a full-scale experimental study, Theoretical Foundation of Civil Engineering, MATEC Web of Conferences 196, 01029 (2018), XXVII R-S-P Seminar 2018.