

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)

Строительство, эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Прочность, жесткость и трещиностойкость изгибаемых
железобетонных элементов со сферическими пустотообразователями

Обучающийся

М.Е. Булгаков

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Научный
руководитель

канд. техн. наук, доцент, Д.С. Тошин

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. пед. наук, доцент, О.Н. Брега

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Рецензент

канд. техн. наук, д-р. экон. наук, профессор, А.А. Руденко

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2023

Оглавление

Введение.....	3
Глава 1 Анализ основных типов изгибаемых железобетонных элементов	5
1.1 Общие сведения об изгибаемых железобетонных элементах.....	5
1.2 Преимущества и недостатки плит перекрытия.....	17
1.3 Требования, предъявляемые к железобетонным плитам перекрытия....	18
Глава 2 Подготовка к испытаниям	21
2.1 Разработка программы проведения испытаний.....	21
2.2 Характеристика и изготовление партии образцов.....	21
2.3 Установка для проведения испытаний	29
2.4 Методика проведения испытаний	31
2.5 Подготовка испытываемых образцов и определение основных характеристик к проведению испытаний	34
Глава 3 Обработка результатов испытаний.....	40
3.1 Испытание опытных образцов.....	40
3.2 Анализ результатов испытаний	56
Заключение	67
Список используемой литературы и используемых источников.....	68

Введение

Актуальность и научная значимость настоящего исследования заключается в том, что в нынешней экономической ситуации необходима оптимизация конструктивных решений, позволяющая экономить на материалах, не в ущерб качеству и надежности зданий и сооружений.

Цель исследований – разработка и экспериментально-теоретическое обоснование изгибаемого железобетонного элемента со сферическими пустообразователями.

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

- анализ основных типов изгибаемых железобетонных элементов;
- разработка конструкции облегченного изгибаемого железобетонного элемента со сферическими пустообразователями;
- определение экспериментально-теоретическим путем прочности, жесткости и трещиностойкости образцов моделей изгибаемых железобетонных элементов сплошного сечения и со сферическими пустообразователями.

Предметом исследования магистерской диссертации является прочность, жесткость и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов со сферическими пустообразователями.

Объект исследования магистерской диссертации – облегченный изгибаемый железобетонный элемент.

Методы исследования, используемые в данной магистерской диссертации:

- поиск и анализ литературы, связанной с темой магистерской диссертации;
- экспериментально-теоретическое обоснование эффективности использования сферических пустообразователей в изгибаемый железобетонных элементах.

Научная новизна магистерской диссертации заключается в следующем:

- разработка нового типа изгибаемого железобетонного элемента со сферическими пустотообразователями;
- получение экспериментально-теоретических характеристик нового типа железобетонного изгибаемого элемента со сферическими пустотообразователями, который не уступает характеристикам железобетонных изгибаемых элементов сплошного сечения.

Практическая значимость исследования состоит в:

- применении в строительстве изгибаемых железобетонных элементов со сферическими пустотообразователями.

Апробация и внедрение результатов работы.

Статья «Несущая способность железобетонных балок со сферическими пустотообразователями» опубликована в сборнике тезисов научно-практической конференции «Студенческие Дни науки ТГУ» (Тольятти, 2022 г.).

Глава 1 Анализ основных типов изгибаемых железобетонных элементов

1.1 Общие сведения об изгибаемых железобетонных элементах

Изгибаемые железобетонные элементы – элементы, подвергающиеся действию одного изгибающего момента или изгибающего момента с поперечной силой.

К таким элементам относятся балки и плиты.

Балки представляют собой конструкции, у которых длина значительно превышает любой из размеров поперечного сечения, воспринимает и передает нагрузки от выше лежащих конструкций. Для повышения несущей способности и предотвращения разрушений такие элементы укрепляются арматурой.

К балкам относятся: ригели, перемычки, подкрановые и фундаментные балки.

Плита перекрытия представляет собой горизонтальную конструкцию в зданиях и сооружениях, которая разделяет здание на этажи, воспринимает и передает нагрузку на ниже лежащие конструкции [18].

Рассмотрим основные виды железобетонных плит перекрытия.

Сборные железобетонные плиты

Сборные железобетонные плиты перекрытия производят непосредственно на заводах ЖБИ и на строительную площадку доставляют в готовом для монтажа виде.

Плиты перекрытия в форме настилов представляют собой элементы, уложенные вплотную, заанкированные между собой и несущими вертикальными конструкциями, щели между которыми заполняются бетоном. Это обеспечивает совместную работу всей конструкции.

Они разделяются на следующие типы: по способу армирования и виду поперечного сечения.

Способы армирования:

- с использованием ненапряженной арматуры;
- с использованием предварительно напряженной арматуры.

Поперечное сечение может быть:

- сплошное,
- многопустотное,
- ребристое.

Сплошные плоские плиты

Сборные железобетонные плиты сплошного сечения считаются самыми прочными из всех видов плит. Используются в строительстве всех конструктивных типов здания (рисунок 1 и 2) [3].

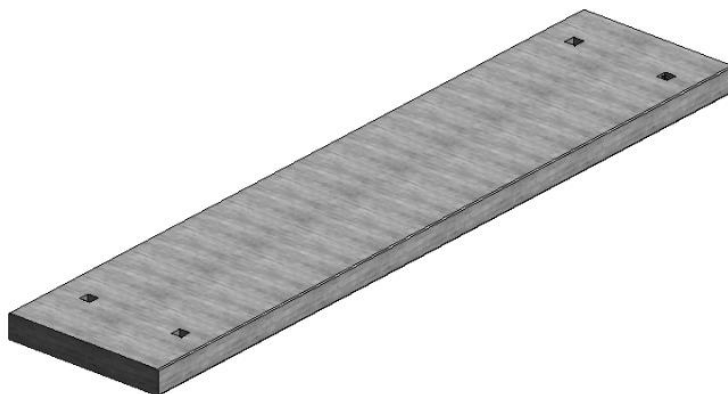


Рисунок 1 – Сплошная железобетонная сборная плита

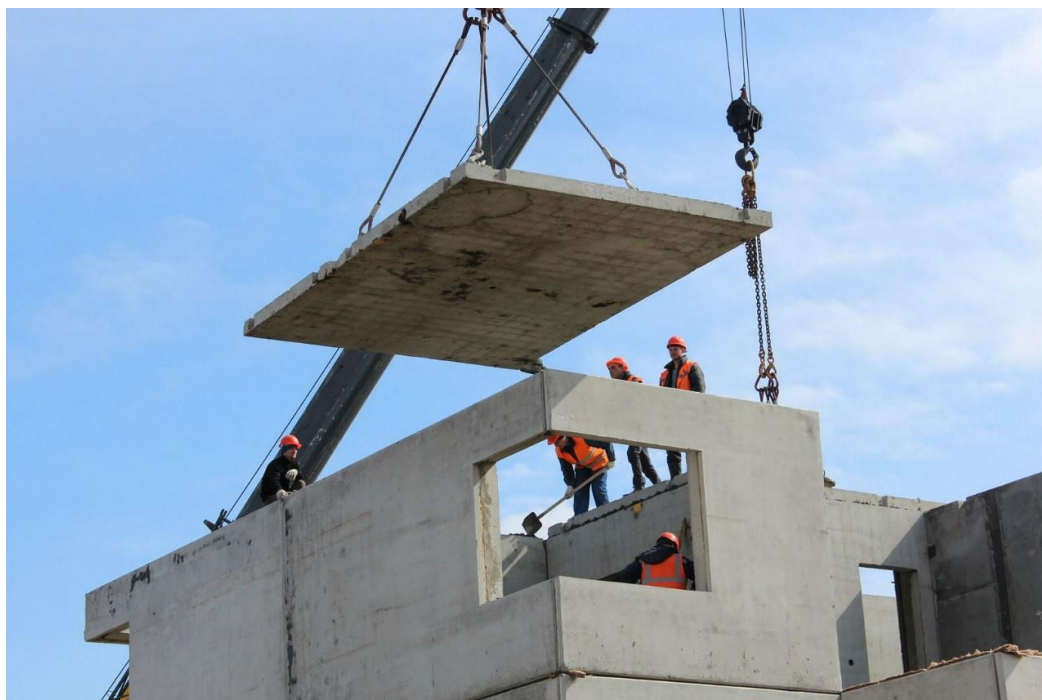


Рисунок 2 – Сплошная железобетонная сборная плита во время монтажа

Многопустотные плиты

Многопустотные плиты имеют самое большое распространение. Они изготавливаются длиной до 12 метров и, как и сплошные плиты, используются в строительстве всех конструктивных типов здания.

Длина пролета влияет на толщину плиты. Толщина плит варьируется от 160 мм до 220 мм.

Многопустотные плиты перекрытия называются так из-за того, что имеют вдоль тела плиты круглые или овальные сквозные отверстия (рисунок 3 и 4).



Рисунок 3 – Многопустотная железобетонная сборная плита марки ПБ



Рисунок 4 – Многопустотная железобетонная сборная плита марки ПБ во время монтажа

Такие плиты, в отличие от сплошных, являются оптимизированными по расходу бетона, так как из тела плиты убран «балластный» бетон, который практически не участвует в работе элемента.

Ребристые плиты

Ребристые плиты перекрытия представляют собой сплошную плиту с ребрами в одном или двух направлениях. Такой тип плит перекрытия чаще всего используют при строительстве промышленных зданий и сооружений (рисунок 5).

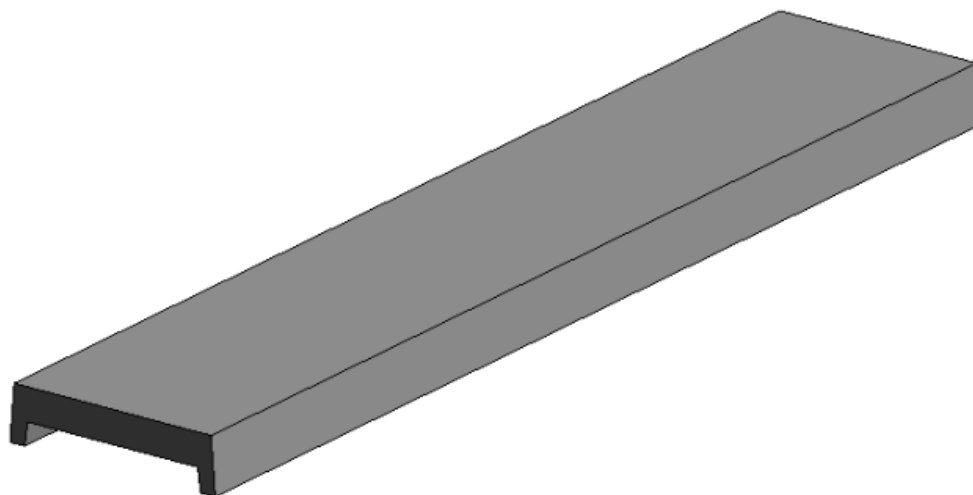


Рисунок 5 – Ребристая железобетонная сборная плита

Как и многопустотные, ребристые плиты являются оптимизированными по расходу бетона, в зоне растяжения количество бетона минимально – он весь локализован в зоне сжатия.

Монолитные железобетонные плиты

Монолитные железобетонные плиты отличаются от сборных тем, что их устраивают непосредственно на строительной площадке [17].

Такие перекрытия применяют в строительстве зданий, имеющих сложную форму в плане или если имеют место большие нагрузки.

Монолитные перекрытия так же разделяются на следующие типы:

- безбалочные перекрытия – сплошные плиты, точками опирания могут являться колонны (рисунок 6), стены, пилоны. Имеют большое распространение при строительстве жилых зданий;
- балочные перекрытия опираются на балки, которые опираются на колонны. В этом случае именно балки несут на себе основную нагрузку. Их располагают вдоль или поперек здания, либо в обоих направлениях;
- ребристые перекрытия являются облегченным типом перекрытий. Они включают в себя главные и второстепенные балки. Плита опирается на второстепенные балки, второстепенные на главные, а главные, в свою очередь, на колонны. В такой конструкции именно главные балки передают нагрузку. Распространены при строительстве промышленных зданий и сооружений.



Рисунок 6 – Безбалочное монолитное перекрытие

Одна из новых разработок для получения облегчённых конструкций – технология «BubbleDeck». Это сборно-монолитная плита, в которой

заполнителем являются несъемные пустотелые вкладыши, способные облегчить конструкцию на 20-40% от массы аналогичной конструкции, но имеющую сплошное сечение (рисунок 7). Замещенный пустотообразователями объем бетона практически не участвует в работе элемента. Также, одним из преимуществ этой технологии является экономическая выгода от сокращения количества требуемой бетонной смеси и сокращения транспортных издержек.

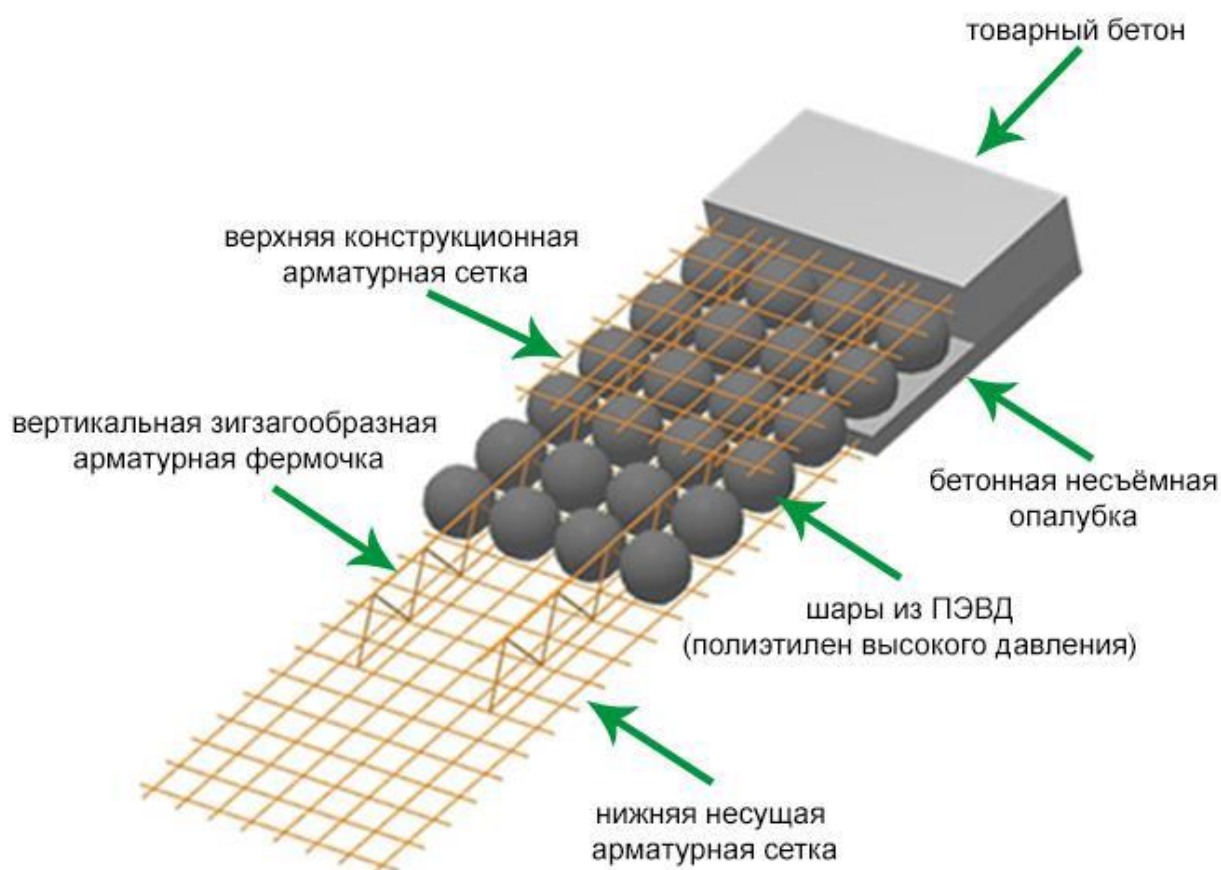


Рисунок 7 – Устройство плиты «BubbleDeck»

Процесс устройства перекрытия «BubbleDeck» показан на рисунке 8.



Рисунок 8 – Процесс укладки шаров перекрытия «BubbleDeck»

Пластиковые шары – вкладыши, представляют собой полые шары в форме сферы или эллипса, изготовленные из полиэтилена, поливинилпропилена или поливинилхлорида. Диаметр вкладышей, в зависимости от толщины изготавливаемой плиты, варьируется от 18 до 36 см. Шары равномерно распределяются в арматурном каркасе, а ячейки верхней и нижней сетки имеют специальную форму, чтобы шары не теряли своего проектного положения [4].

Были проведены испытания двухсторонних плит на влияние формы пустотообразователя на одностороннее поведение при изгибе. Испытания проводились с пустотами в виде шара из пенополистирола, в виде прямоугольного параллелепипеда и виде сферы (BubbleDeck Technology 2008; Chung и соавт. 2010; Kim и соавт. 2011; Daliform Group 2014), размещенными в середине плиты между верхней и нижней армирующими

сетками. Это снижает собственный вес плиты до 50% по сравнению с обычной сплошной плитой без каких-либо существенных изменений в ее структурных характеристиках (Vjörnsón 2003; Harding 2004). Например, двухсторонняя пустотелая плита снижает вес на 44% по сравнению со сплошной плитой с такой же способностью к изгибу (BubbleDeck Technology 2008). Эта система представляет собой общую экономичную и эффективную систему пола; она экологически безопасна, так как пустотообразователи изготовлены из переработанного пластика.

Эти исследования показали, что двухсторонние плиты с пустотами имеют немного меньшую жесткость и аналогичную прочность по сравнению со сплошной плитой (BubbleDeck Technology 2008; Kim 2011; Ibrahim и соавт. 2013; Valivonis и соавт. 2014). Плита с пустотами в форме сферы показала почти такую же способность к изгибу, что и сплошная плита. Свойства материала и прочность пустот в форме сферы сильно влияют на прочность на изгиб плиты с пустотами (Kim и соавт. 2011). Жесткость на изгиб плиты с пустотами в виде сферы составляет 80–90% сплошной плиты, однако пустотелая плита показала такую же прочность на изгиб, что и сплошная плита (Midkiff 2013) [29].

Также был проведен макромеханический анализ сферических пустот двухсторонних железобетонных плит. За последние десятилетия проведен большой объем аналитических исследований по моделированию сплошных, ребристых и пустотелых железобетонных плит. Как правило, существует три принципиально разных подхода к получению определяющих уравнений на основе механики сплошной среды для прогнозирования структурного поведения (откликов) системы двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами. К ним относятся феноменологический, численный и микромеханический подходы.

Феноменологический подход основан на проведении экспериментов на испытываемых образцах, размеры которых достаточны для определения жесткостных свойств. Свойства жесткости, полученные в результате

экспериментов, затем используются для определения оценок параметров предполагаемой конститутивной модели при прогнозировании макроскопического/структурного поведения плиты. Этот подход, безусловно, дает наилучшее преимущество изотропным материалам, потому что характеристики отклика материалов могут быть хорошо описаны на основе нескольких тестов (Ali и Urgessa 2012, Ali and Urgessa 2014a). Однако анизотропный и неоднородный характер системы двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами значительно усложняет задачу экспериментального определения свойств жесткости. Для описания полной трехмерной конститутивной модели двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами необходимо получить ее механические свойства во всех ортогональных плоскостях, что трудно получить, используя только результаты испытаний.

Численный подход основан на детальном анализе методом конечных элементов, который является мощным методом проведения структурного анализа. Однако проведение трехмерного конечно-элементного анализа на большой (полномасштабной) двухсторонней железобетонной плите со сферическими пустотами имеет свои проблемы, поскольку геометрия сложна и требует алгоритмов контакта между различными составляющими. Сообщается об ограниченном моделировании методом конечных элементов, в котором исследуются структурные возможности и механизмы отказа систем двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами при различных конфигурациях нагрузки без проведения дорогостоящих экспериментальных испытаний (Schnellenbach-Held и Pfeffer 2002, Abramski и соавт. 2010 и Ali and Urgessa 2014b). Результаты этих исследований подтвердили, что системы двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами являются экономически эффективными по сравнению с обычными монолитными бетонными плитами.

Вычислительные усилия для анализа системы двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами с использованием

подробного трехмерного конечного элемента могут быть значительно уменьшены за счет третьего аналитического подхода: моделирования его как эквивалентной толстой ортотропной пластины посредством процесса микромеханической гомогенизации. Во-первых, извлекается репрезентативный элемент объема, содержащий всю геометрическую и определяющую информацию двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами. Затем определяются осевые, изгибные и крутильные свойства репрезентативного элемента объема на основе применения подходящих граничных условий, которые генерируют характерные режимы деформации и вращения. После завершения процесса гомогенизации механические свойства репрезентативного элемента объема используются для проведения макромеханического анализа всей системы двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами.

Цель микромеханической гомогенизации состоит в том, чтобы установить макроскопическое поведение гетерогенной системы путем захвата эффективных (общих) характеристик ее гетерогенности. Затем гетерогенный материал заменяется гомогенным материалом, общие характеристики которого хорошо отражают гетерогенную систему (Urgessa и Casey 2013). В используемом здесь процессе гомогенизации репрезентативного элемента объема подвергается восьми линейно независимым деформациям (включая смещения и повороты). Для каждого из восьми случаев деформации/вращения эквивалентные силы реакции и моменты на ограниченных границах репрезентативного элемента объема рассчитываются на основе анализа КЭ-модели. Затем на основе результатов КЭ-анализа определяются эквивалентные свойства материала, такие как коэффициенты жесткости репрезентативного элемента объема. Эти коэффициенты аналогичны тому, что обычно называют матрицами жесткости в механике композитных материалов (Challagulla и соавт. 2010).

Макромеханический анализ примера системы двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами был проведен с

использованием матриц жесткости, определенных на основе микромеханического моделирования репрезентативного элемента объема. Двухсторонняя железобетонная плита со сферическими пустотами толщиной 340 мм, длиной 12 м и шириной 10 м подвергалась вертикальной равномерной распределенной нагрузке 20 кПа. Репрезентативный элемент объема, выбранный для микромеханической характеристики, составлял 300 мм на 300 мм в плоскостных направлениях. После того, как матрицы жесткости для репрезентативного элемента объема были охарактеризованы, был проведен макромеханический анализ плиты с использованием классических теорий пластин.

Исходя из размеров двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами, типичное отношение толщины к пролету может достигать 4%. Поэтому в анализ была включена теория сдвиговой деформации первого порядка. В этой теории учитывается влияние поперечной силы сдвига на деформацию двухсторонних железобетонных плит со сферическими пустотами, а распределение деформации поперечного сдвига предполагается постоянным по толщине пластины (Cecchi и соавт. 2007). Поправочный коэффициент сдвига был применен для учета энергии деформации из-за деформации сдвига. Другая широко цитируемая теория пластин, теория Кирхгофа-Лява, которая, как ожидается, занижает прогибы и напряжения, также была включена в исследование для целей сравнения (Reddy 2006). Была написана программа MATLAB, которая определяет прогиб в средней плоскости, изгибающие моменты в обоих плоскостных направлениях, крутящий момент, максимальные изгибающие напряжения в обоих плоскостных направлениях и напряжение сдвига в плоскости гомогенизированной плиты с использованием теории сдвиговой деформации первого порядка и теории Кирхгофа-Лява. Было обнаружено, что результаты теории Кирхгофа-Лява меньше, чем теории сдвиговой деформации первого порядка, примерно на 10% из-за того, что теория Кирхгофа-Лява не учитывает влияние поперечного сдвига и поперечных нормальных

напряжений. Это наблюдение справедливо для всех параметров отклика (прогиб, изгибающий момент и изгибающее напряжение), за исключением крутящего момента, для которого наблюдаемая разница составляет около 20 %. Последнее может быть объяснено тем фактом, что в теории Кирхгофа-Лява предполагалось, что элементы остаются перпендикулярными средней плоскости, однако равновесие требует, чтобы присутствовали плоские компоненты напряжения, вызывающие существенное скручивание этих элементов. После того, как процесс гомогенизации был завершен, для определения структурных откликов были использованы две классические теории пластин. Результаты обеих теорий достаточно хорошо предсказывали поведение плиты, и результаты были в пределах 10%, за исключением предсказания крутящего момента [27].

1.2 Преимущества и недостатки плит перекрытия

Сборные и монолитные плиты перекрытия имеют свои положительные и отрицательные качества, исходя из которых те или иные виды перекрытий используются в конструкциях различных типов зданий и сооружений.

Рассмотрим положительные и отрицательные качества сборных плит перекрытия.

Положительной особенностью таких плит является то, что они легко и быстро монтируются; имеют достаточный предел огнестойкости.

Недостатком сборных плит перекрытия является то, что их размеры фиксированы; они ограничены по форме. Изготовление нестандартных плит перекрытия влечет за собой их удорожание.

Монолитные плиты перекрытия, так же, как и сборные, имеют достаточный предел огнестойкости. Кроме того, такие перекрытия используют в конструкциях со сложной формой в плане, они не привязаны к типовым размерам, можно реализовать практически любую задумку архитектора.

Недостатком монолитных перекрытий является высокая трудоемкость при их устройстве. Для их устройства требуется опалубка, необходимо время на набор прочности бетона, время на уход за бетоном. В целом, скорость устройства монолитных перекрытий увеличивает время строительства здания или сооружения.

Перекрытия «BubbleDeck» сочетают в себе многие преимущества бетонных перекрытий и исключают многие их недостатки. По словам автора технологии, преимуществами «BubbleDeck» являются:

- возможность создавать изделия и конструкции любой формы;
- быстрота возведения;
- экологически чистое производство - экономия энергии, снижение выбросов CO^2 и других вредных веществ (уменьшение количества бетона, возможность использования перерабатываемых материалов);
- возможность устройства больших пролетов без ригелей;
- снижение веса не только самого перекрытия, но и тех конструкций, на которые оно опирается, не теряя несущую способность.

1.3 Требования, предъявляемые к железобетонным плитам перекрытия

К железобетонным плитам перекрытия предъявляются определенные требования в отношении прочности, надежности, эффективности и безопасности, а именно:

- железобетонные перекрытия зданий и сооружений должны обладать достаточной прочностью и жесткостью, чтобы выдержать нагрузку от собственного веса (постоянная нагрузка), полезную нагрузку от людей, оборудования, снега и ветра (временная нагрузка), величина которых определяется нормативно исходя из его месторасположения и назначения здания [19], [20];

- возведение перекрытий должно быть, по возможности, наименее трудоемко и быть экономически выгодно [22], [23];
- перекрытия зданий должны соответствовать предъявляемым нормам и специальным указаниям по изоляции ударного шума [21], [30];
- требования теплозащиты предусматривают то, что перекрытия будут обеспечивать теплозащиту между помещениями с разными температурными графиками, например, между тамбуром и помещением квартиры на втором этаже; в узлах сопряжений перекрытий с наружными стенами не будет образовываться «мостик холода» и не будет появляться конденсат [28];
- класс пожарной опасности и предел огнестойкости изделий должны соответствовать установленным в необходимых случаях в стандарте или рабочей документации с учетом назначения и предусматриваемой области применения изделий [10].

С использования высокопрочных материалов, увеличенных пролетов и более тонких конструктивных элементов, значительным аспектом становится контроль за прогибами. Бетонная промышленность и инженерное сообщество заинтересованы в том, чтобы производить бетонные конструкции, которые не только имеют достаточный запас прочности до разрушения, но и обеспечивают приемлемые эксплуатационные характеристики при минимальных затратах (анализ минимальных затрат) [26].

Выводы по первой главе

Плиты перекрытия является важным конструктивным элементом здания или сооружения. Плита перекрытия несет и передает нагрузку на нижележащие элементы конструкций здания, является частью каркаса здания.

Различные разработки в области строительных материалов и конструирования плит перекрытий направлены на снижение их веса и

количества используемого бетона, что ведет за собой снижение стоимости строительства, а также положительно влияет на экологическую составляющую строительства [1].

Для научного подтверждения эффективности данной конструкции плиты перекрытия необходимо провести испытания аналогичной конструкции на несущую способность, прочность, жесткость и трещиностойкость.

Для испытания конструкции будут взяты модели железобетонных балок, в тело одной из которых будут введены шарообразные пустотообразователи из пенополистирола.

Если результаты испытаний будут положительными, то легкие монолитные плиты со сферическими пустотами могут стать удобной, практичной и экономически эффективной конструкцией для строительства сложных, но безопасных и комфортных зданий и сооружений.

Глава 2 Подготовка к испытаниям

2.1 Разработка программы проведения испытаний

В рамках научно-исследовательской работы запланировано испытание и сравнение характеристики опытных образцов балок сплошного сечения и балок со сферическими пустообразователями.

Программа испытаний предусматривает сравнение таких параметров, как: прочность, жесткость и трещиностойкость в изгибаемых железобетонных элементах и включает в себя следующее:

- определение кубиковой и призмочной прочности бетона, проведение испытаний на сжатие стандартных образцов кубов и образцов призм с приложенной кратковременной нагрузкой для определения прочности бетона [11], [12], [15]. Испытано 3 стандартных образца кубов и 2 образца призм. Размеры кубов составляют $150 \times 150 \times 150$ мм, размеры для призм $150 \times 150 \times 600$ мм [13], ;
- проведение испытаний на изгиб железобетонных балок. Испытано два образца железобетонных балок, а именно: балка сплошного сечения и балка со сферическими пустообразователями, проектный размер обеих балок составляет $150 \times 170(h) \times 1560$ мм. Роль пустот выполняют шары из пенополистирола диаметром 120 мм [5].

Программа испытаний основывается на лабораторных испытаниях бетонных и железобетонных образцов на основании ГОСТ 10180-2012 [9], ГОСТ 24452-80 и ГОСТ 8829-2018 [8], [16].

2.2 Характеристика и изготовление партии образцов

Образцы балок выполнялись из бетона класса В25, заполнителем служит гранитный щебень фракции 5-20 мм [14].

Армирование балок представляет из себя пространственный каркас. Для пространственного каркаса применялась арматура класса А500С [7]: продольная рабочая арматура диаметром 10 мм, продольная конструктивная арматура диаметром 8 мм, поперечная рабочая арматура диаметром 6мм.

Количество образцов и геометрические характеристики приведены в таблице 1. Спецификация материалов приведена в таблицах 2 и 3.

Таблица 1 – Перечень испытываемых образцов

Наименование образца, размеры, мм	Класс бетона	Количество образцов, шт
Балка Б1 сплошного сечения 1560×150×170(h)	В25	1
Балка Б2 со сферическими пустотообразователями 1560×150×170(h)	В25	1

Схема армирования балки Б1 представлено на рисунке 9.

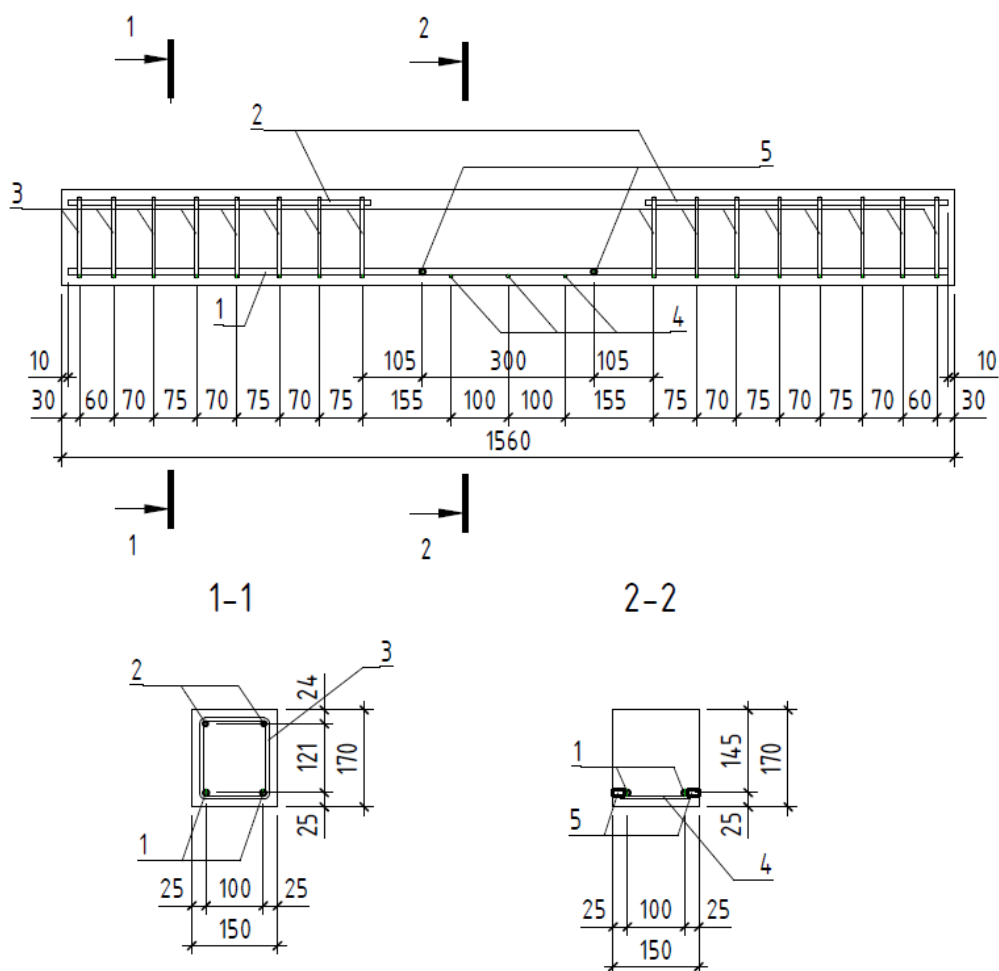


Рисунок 9 – Схема армирования балки Б1

Таблица 2 – Спецификация материалов для балки Б1

Поз.	Наименование	Количество, шт	Примечание
1	ø10 A500C L=1540	2	Продольная рабочая арматура
2	ø8 A500C L=530	4	Продольная конструктивная арматура
3	ø6 A500C L=660	16	Поперечная рабочая арматура (хомут)
4	ø6 A500C L=125	3	Поперечная рабочая арматура
5	Втулка	4	Для крепления приборов измерения (мессур)

Схема армирования и расположение сферических пустообразователей балки Б2 представлено на рисунке 10.

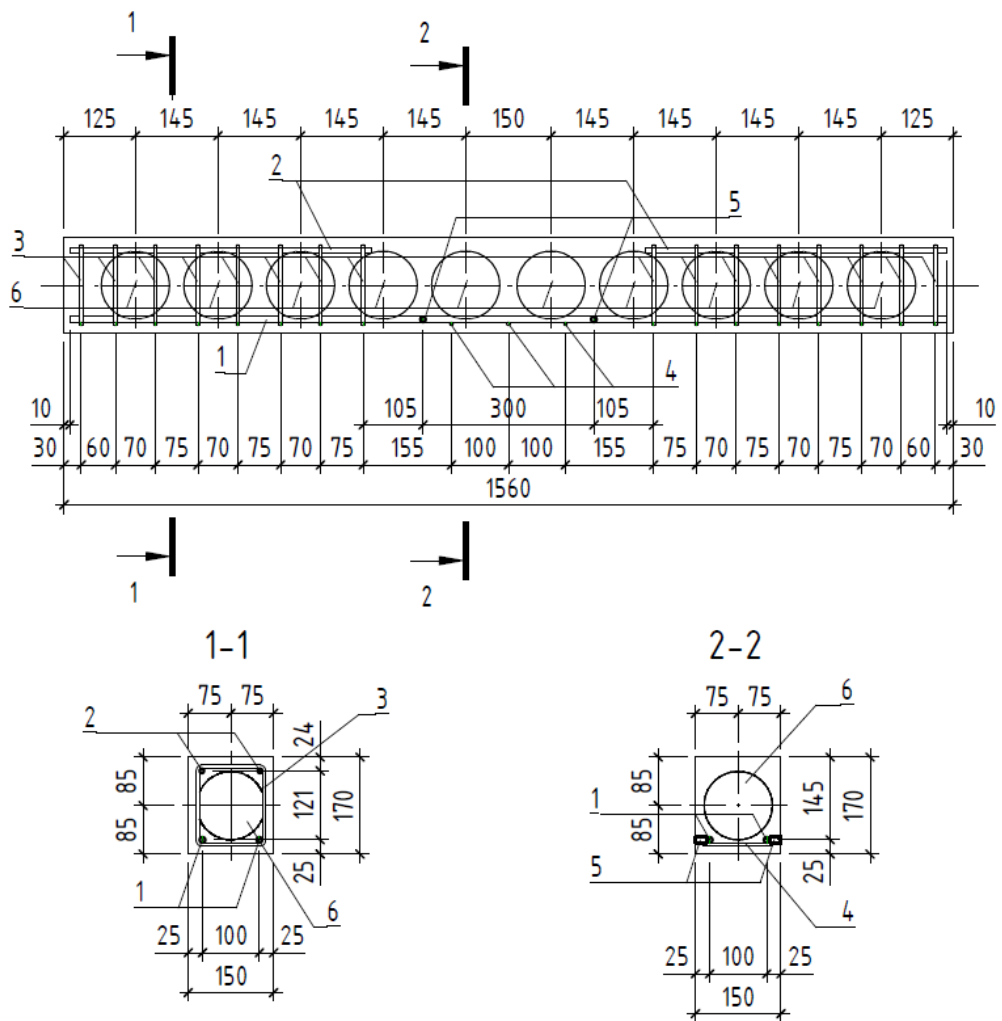


Рисунок 10 – Схема армирования и расположение сферических пустотообразователей балки Б2

Таблица 3 – Спецификация материалов для балки Б2

Поз.	Наименование	Количество, шт	Примечание
1	ø10 A500C L=1540	2	Продольная рабочая арматура
2	ø8 A500C L=530	4	Продольная конструктивная арматура
3	ø6 A500C L=660	16	Поперечная рабочая арматура (хомут)
4	ø6 A500C L=125	3	Поперечная рабочая арматура
5	Втулка	4	Для крепления приборов измерения (мессур)
6	Шарообразный пустотообразователь ø120	10	Шарообразный пустотообразователь из пенополистирола

Изготовление каркасов для образцов балок производилось в лаборатории Архитектурно-строительного института ТГУ. Изготовленный арматурный каркас балки сплошного сечения представлен на рисунке 11.



Рисунок 11 – Каркас балки Б1

Процесс изготовления арматурного каркаса балки со сферическими пустотообразователями усложнялся тем, что диаметр шаров превосходил размер хомутов и расстояние между ними, из-за чего шары устанавливались в каркас в процессе вязки (рисунок 12). По этой причине изготовление каркасов осуществлялось методом вязки арматуры.



Рисунок 12 – Каркас балки Б2

Для изготовления образцов балок были изготовлены две деревянные опалубки из ОСП толщиной 11мм (рисунок 13). Для сохранения пространственной жесткости опалубки был применен деревянный брус 40×60 мм.



Рисунок 13 – Опалубка для изготовления образца балки

Размещение шаров в проектном положении предусматривалось с помощью капроновых нитей, продетых сквозь отверстия в шарах с последующим их натяжением и закреплением на опалубке.

После завершения всех подготовительных работ формы были доставлены на завод АО «ТзЖБИ им. В.К. Макарова», где производилось бетонирование. Балки, кубы и призмы бетонировались из одной партии бетонной смеси. Образцы балок после бетонирования показаны на рисунке 14. После бетонирования образцов осуществлялся уход за бетоном.



Рисунок 14 – Образцы балок после бетонирования

Доставка образцов с завода ТзЖБИ в лабораторию Архитектурно-строительного института ТГУ (рисунок 15) осуществлялась при наборе 70% прочности бетона, а именно, по истечении 7 суток после бетонирования с соблюдением необходимых мер по предохранению их от повреждений [6]. В период хранения опытных образцов в лаборатории температурно-влажностный режим сохранял стабильные температурные параметры, без резких перепадов температуры.



Рисунок 15 – Готовые образцы балок возрастом 7 суток

2.3 Установка для проведения испытаний

Испытания образцов балок проводятся на испытательном стенде, описанном в работе Ерышева А.В., Колганова Ю.А., Горшенина Е.В. [24] показанном на рисунке 16.

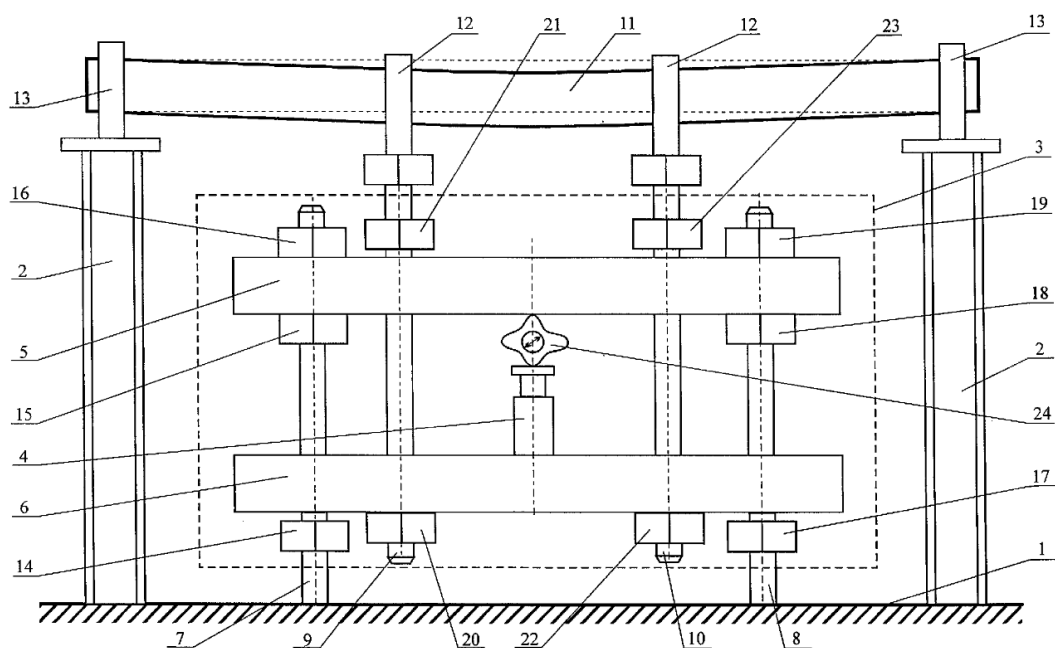


Рисунок 16 – Вид испытательной установки для испытания балочных конструкций [24]

Установка для испытания балочных конструкций работает следующим образом. «Балочную конструкцию 11 устанавливают на опорные стойки 2 и закрепляют элементами 13. Тяги 9 и 10 посредством хомутов 12 закрепляют на балочной конструкции 11, подсоединив к ней тем самым нагружающее устройство. Подав под давлением масло от насосной станции в источник дискретной нагрузки 4 - гидравлический домкрат одностороннего действия, нагрузка передается через реверсивный механизм 3. В зависимости от положения регулировочных гаек 14-23 на тягах 7 и 8 и 9 и 10 изменяют направление усилия, что дает возможность балочной конструкции 11 деформироваться в плоскости действия изгибающего момента со сменой стрелы прогиба.

Для создания прогиба вниз гайки 14 и 17 и гайки 21 и 23 отворачивают, освобождая траверсу 6, давая ей свободный ход вниз под действием источника дискретной нагрузки 4, а гайки 16 и 19 поджаты к траверсе 5 и ограничивают ее движение вверх. Траверса 6 вывешивается на гайках 20 и

22, которые ограничивают ее движение вниз. Но при приложении усилия источником 4, траверса 6, опираясь на гайки 20 и 22, начинает тянуть вниз тяги 9 и 10, подвешенные на балочной конструкции 11, которые нагружают ее, создавая определенный изгибающий момент, действующий на балочную конструкцию 11 в местах установки тяг 9 и 10. Таким образом осуществляют испытание балочной конструкции в одном направлении приложения изгибающего момента - положительном» [24].

2.4 Методика проведения испытаний

«Определение деформаций предусматривало установку прогибомеров Аистова, тензометров Гугенбергера и мессур с индикаторами часового типа. Прогибомерами Аистова измерялись 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:

- линейное перемещение отдельных точек конструкции при нагружении исследуемого объекта (прогибомеры Аистова (марки БПАО) П1- П3, мм);

- линейная деформация арматуры в зоне чистого изгиба приложенной нагрузки (мессуры М1-М2, мм);
- абсолютная деформация на участке исследуемого объекта (тензометры Гугенбергера Т1-Т2, Н);
- усилия, приложенные к объекту исследования (динамометр Д1, кН)» [25].

Схема установки для испытания балочных конструкций показана на рисунке 17.

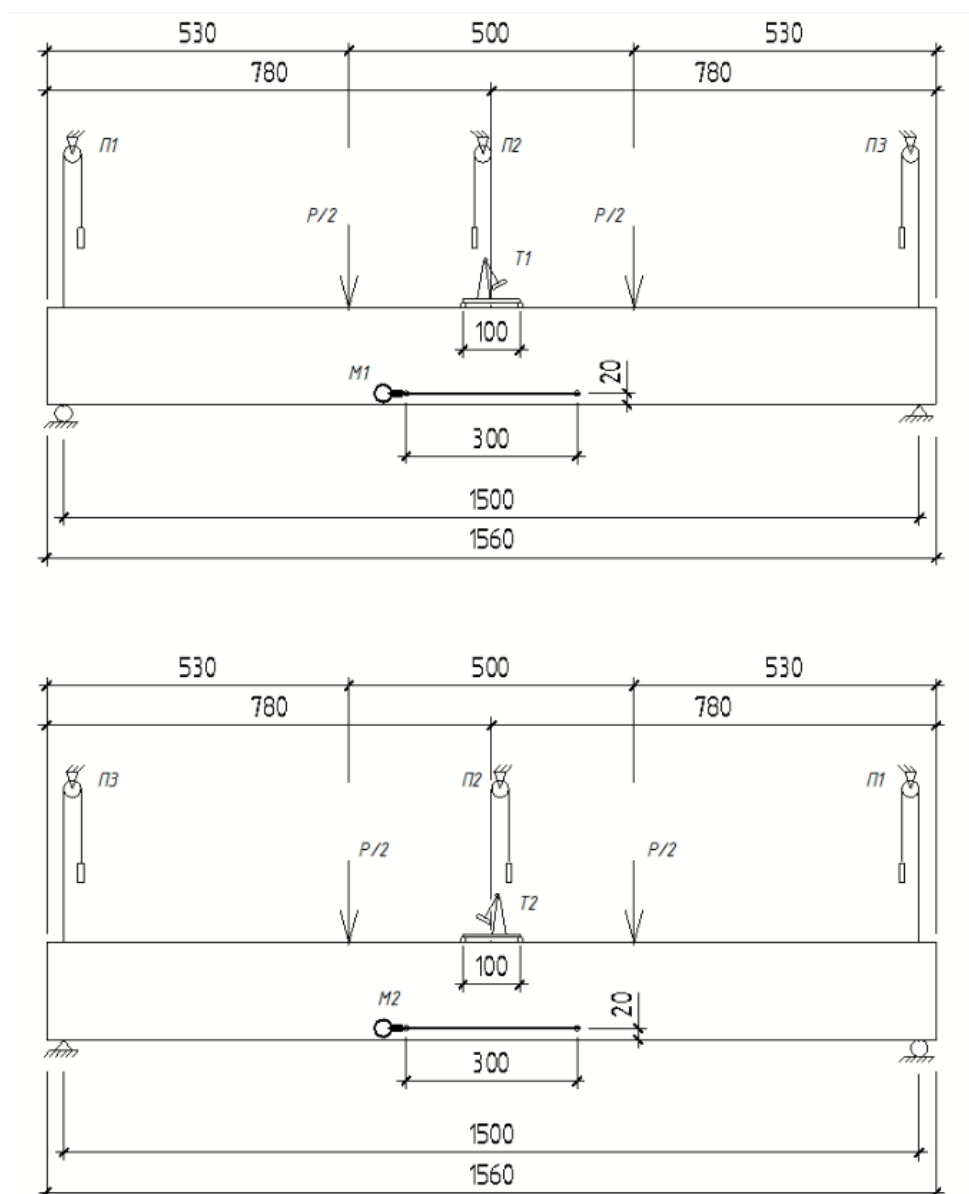


Рисунок 17 – Схема установки для испытаний балочных конструкций

Перечень используемых установок, приборов и средств измерений при испытании образцов балок приведен в таблице 4.

Таблица 4 – Перечень установок, приборов и средств измерений

Поз.	Наименование, тип, марка оборудования или средства измерения	ГОСТ, ТУ, технические характеристики, патент	Примечание
1	Экспериментальный стенд	RU2262698 С1	Проведение испытаний на изгиб
2	Прогибомер Аистова	ТУ 3949-165-60632410- 2012	Измерение перемещение конструкции при нагружении
3	Мессура	ГОСТ 1.0-2015	Измерение деформации арматуры в точке приложенной нагрузки
4	Тензомерт Гугенбергера	ГОСТ 18957-73	Измерение деформаций
5	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 т. 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 тензомертами Гугенбергера в среднем пролете железобетонной балки, установленными с шириной базы

100 мм. С помощью многооборотного прогибомера Аистова типа 6ПАО с ценой деления 0,01 мм, установленными на стальные тяжи 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 0,01 мм и удлинителем с плоским наконечником под индикатор, установленные в специальные держатели, вкрученные во втулки балки с подсоединением к продольной арматуры, расположенные по обе стороны балки» [25].

2.5 Подготовка испытываемых образцов и определение основных характеристик к проведению испытаний

«Программа экспериментальных исследований включает испытание образцов. Вначале определялась кубиковая прочность по трем стандартным образцам кубов. Затем определялась призмная прочность по двум образцам призм. Также было предусмотрено испытание двух образцов железобетонных балок сплошного сечения и со сферическими пустотообразователями на изгиб.

Испытания на сжатие контрольных образцов для установки прочности кубов и призм производились посредством гидравлического пресса. В рамках подготовки к проведению испытаний был изучен ГОСТ 24452-80 [13], правила эксплуатации пресса и приборов, инструкция по безопасности труда. Все испытания проводились в соответствии с ГОСТ 10180-2012 [9], ГОСТ 24452-80 [13].

Непосредственно перед проведением испытаний образцы осматривались на предмет наличия дефектов, сколов и, по необходимости,

удалялись неровности. После визуального осмотра были проведены измерения фактических размеров образцов.

Далее требовалось центровка образцов по оси пресса. Образец с выровненными опорными гранями и с установленными на нем рамками и тензодатчиками (для призм) устанавливают на нижнюю опорную плиту пресса и центрируют.

Для выравнивания опорных участков поверхностей образцов использовалась быстротвердеющая смесь – гипс, с толщиной слоя не превышающим 5 мм. После установки образца, верхнюю плиту пресса вплотную совмещали с верхней плоскостью образца. Образец нагружали постепенно» [25].

Внешний вид образца куба и образца призмы до и после испытания показаны на рисунках 18 и 19.

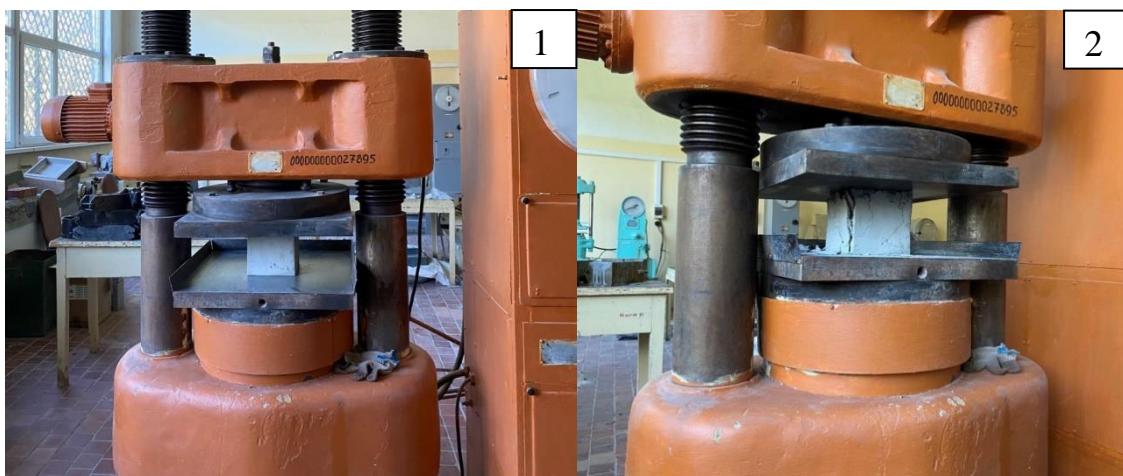


Рисунок 18 – Образец куба до (1) и после (2) испытания

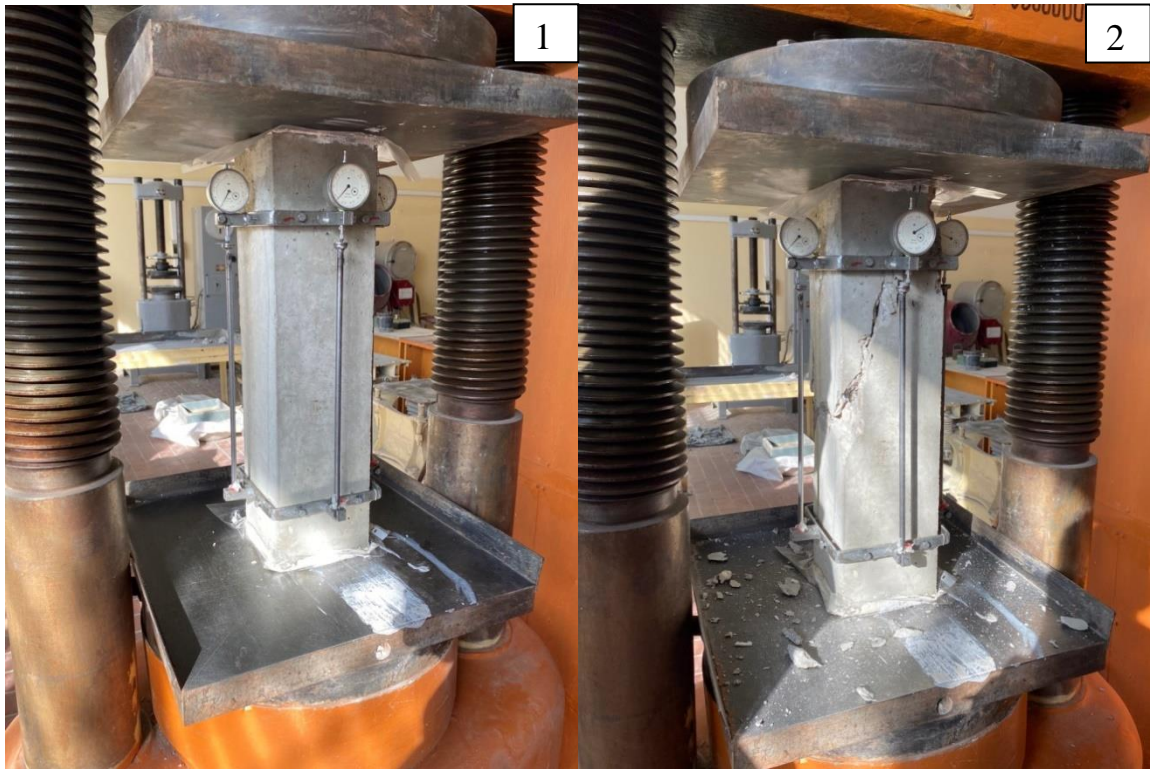


Рисунок 19 – Образец призмы до (1) и после (2) испытания

Результаты статистической обработки данных представлены в таблицах 5 и 6.

Таблица 5 – Характеристики образцов кубов

№ образца	Разрушающая нагрузка R_p , кг	Прочность бетона R_p , кг/см ²	Кубиковая прочность R_k , МПа
1	115 750,00	514,44	51,44
2	113 000,00	502,22	50,22
3	110 000,00	488,89	48,89
$R_{k,ср}$, МПа			50,8

Средняя кубиковая прочность бетона составила $R_{k,ср} = 50,8$ МПа, что соответствует классу бетона изделия В35.

Таблица 6 – Характеристики образцов призм

№ образца	Разрушающая нагрузка R_p , Н	Площадь сечения F , мм ²	Призменная прочность $R_{пр}$, МПа
1	894 856,81	22500	39,77
2	980 665,00	22500	43,59
$R_{п,ср}$, МПа			41,7

Средняя призменная прочность бетона составила $R_{к,ср} = 41,7$ МПа.

Образцы балок, до начала испытания, были осмотрены на наличие дефектов и окрашены белой водо-дисперсной краской (рисунок 20).



Рисунок 20 – Окрашенные образцы балок

Монтаж балок со сферическими пустотами и сплошного сечения на испытательную установку производился вручную. С помощью гипсового раствора на балку прикреплялись стальные пластины размером $4 \times 40 \times 150$ мм с цилиндрами на свои размеченные места к крайним опорным участкам под скобы верхней траверсы стенда. В данном случае цилиндры являются шарнирно-подвижной и шарнирно-неподвижной опорами. Затем балки выставлялись относительно вертикали и горизонтали. Далее устанавливались

измерительные приборы, согласно схеме (рисунок 17). Подготовленные к испытаниям балки представлены на рисунках 21 и 22.

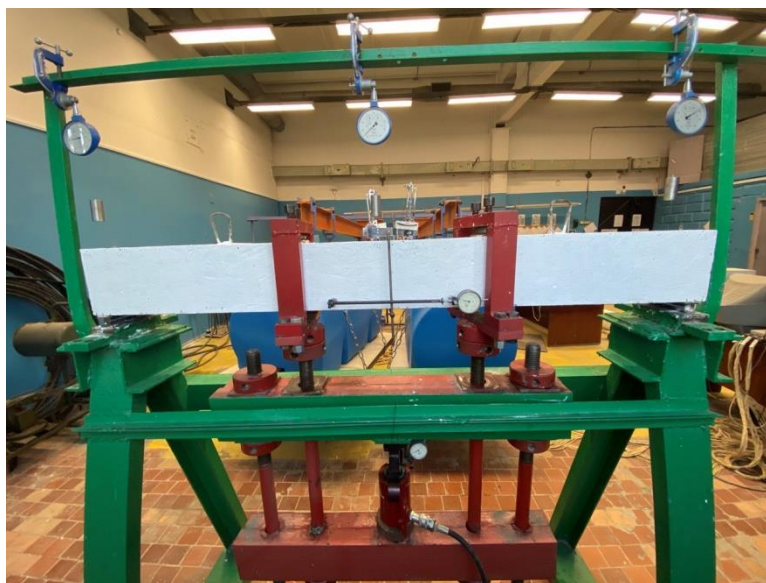


Рисунок 21 – Подготовленная к испытаниям балка сплошного сечения



Рисунок 22 – Подготовленная к испытаниям балка со сферическими
пустотообразователями

Выводы по второй главе

Во второй главе были выполнены следующие задачи:

- разработана программа экспериментальных исследований испытываемых образцов;
- подготовлена схема армирования образцов балок;
- изготовлена опалубка для образцов балок;
- изготовлены образцы балок, кубов и призм на заводе ТзЖБИ с последующей их доставкой в лабораторию Архитектурно-строительного института ТГУ;
- подготовлены опытные образцы для их последующего испытания, а именно: окраска, маркировка, установка приборов измерения и крепления согласно схеме расположения приборов;
- проведены испытания кубов и призм, получены данные для последующего анализа данных.

Глава 3 Обработка результатов испытаний

3.1 Испытание опытных образцов

После испытаний образцов кубов и призм были проведены испытания образцов железобетонных балок, а именно: балки сплошного сечения и балки со сферическими пустотообразователями.

Проведение испытания образцов балок производилось в присутствии научного руководителя и по правилам техники безопасности.

Испытанные балки показаны на рисунках 23 и 24.



Рисунок 23 – Испытанная балка сплошного сечения

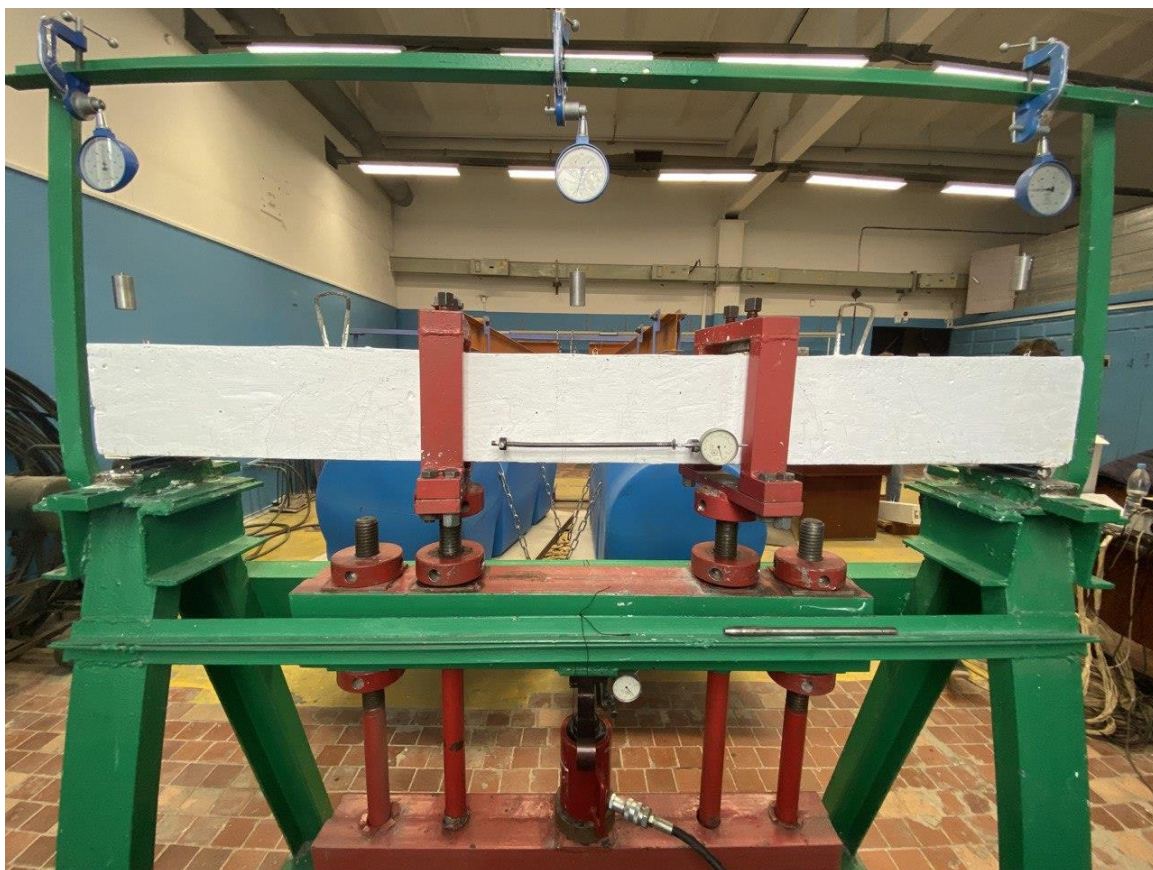


Рисунок 24 – Испытанная балка со сферическими пустотообразователями

До момента появления первых трещин шаг нагружения составлял около 2 процентов, а после образования трещин нагрузка сначала была увеличена до 5 процентов, а затем до 10 процентов от расчетной разрушающей нагрузки. Количество шагов нагружения составило 35 для балки сплошного сечения и 32 для балки со сферическими пустотообразователями. Выдержка каждого шага приложенной нагрузки составила 5 минуты. После каждого шага нагружения проводился визуальный осмотр образцов балок, производилось снятие показаний динамометра, прогибомеров, мессур и тензочувствительных датчиков с последующей записью в журнал проведения испытаний [2]. Опрос измерительных приборов по всем установленным приборам производился в конце каждого шага.

При визуальном осмотре, после каждого шага нагружения, на поверхности бетона (в случае появления) наносились дублирующие формы

трещин линии рядом с фактической трещиной, с указанием шага её появления и последующим ее развития.

«За разрушение испытываемых балок принималась величина изгибающего момента, при котором усредненные по двум мессурам значения относительных деформаций продольной арматуры в растянутой зоны достигали 250×10^5 , что соответствует физическому пределу текучести стальной арматуры класса А500С. 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» [25].

После разрушения испытываемых балок выполнялись следующие мероприятия:

- занесение в журнал испытаний остаточных деформаций в балках после разгрузки;
- установка характера разрушения;
- проведение визуального осмотра, выявления сколов;
- демонтаж измерительного оборудования;
- фиксирование трещин.

Характер, места образования и размер трещин балки сплошного сечения представлены на рисунках 25 и 26.



Рисунок 25 – Трещины в зоне растяжения арматуры балки сплошного сечения



Рисунок 26 – Трещины в середине пролета балки сплошного сечения

При предварительном визуальном осмотре обеих балок можно сказать, что размер и частота появления трещин в балке со сферическими пустотообразователями больше, чем в балке сплошного сечения.

Характер, места образования и размер трещин балки со сферическими пустотообразователями представлены на рисунках 27-29.



Рисунок 27 – Трещины в приопорном участке балки со сферическими пустотообразователями

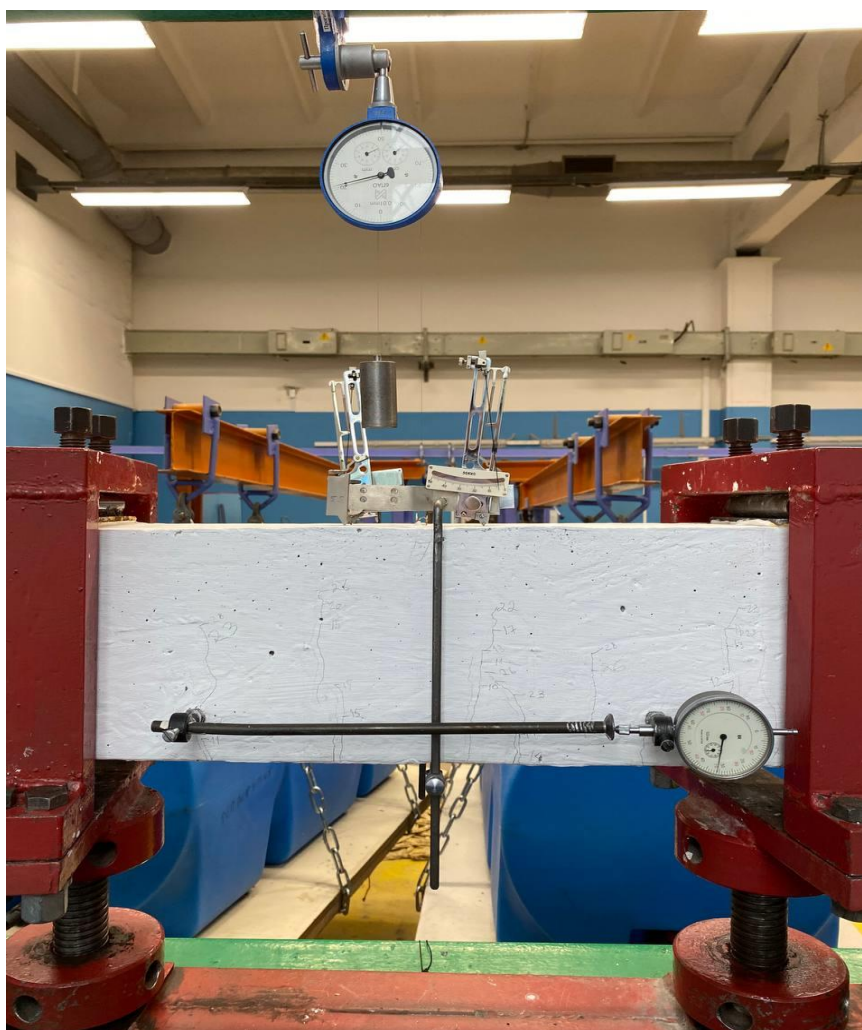


Рисунок 28 – Трещины в середине пролета балки со сферическими
пустотообразователями



Рисунок 29 – Трещины в приопорном участке балки со сферическими пустотообразователями

Демонтаж испытанных балок с испытательной установки производился непосредственно после испытания.

После демонтажа и визуального осмотра балок оказалось, что один из стержней продольной рабочей арматуры балки со сферическими пустотообразователями сместился выше относительно проектного положения на 5 мм.

Протоколы проведения испытаний для балок представлены в таблицах 7 и 8.

Таблица 7 – Протокол проведения испытания образца балки сплошного сечения

№ ступени нагрузки	Маркировка образца	Дата испытания	D, 1 ед.=7 кг	N, кг	t, мин	П1, мм	П2, мм	П3, мм	M1, мм	M2, мм	T1 × 10 ⁻⁵	T2 × 10 ⁻⁵	Прогиб (П2- (П1+П3)/2)	Деформация относительная (M1 × 10 ⁵)	Деформация относительная (M2 × 10 ⁵)	Примечание		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
0	Б1	01.10.22	0	0	0	524	516	2568	750	760	50	50				Начальный отсчет		
					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
1			5	35	5	524	516	2568	750	760	50	50						
					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
2			10	70	10	524	516	2568	750	760	49,5	49,5						
					0	0	0	0	0	0	0	0	-0,5	-0,5	0	0	0	
3			20	140	15	524	517	2568	750	760	49	48,5						
					0	1	0	0	0	0	0	0	-1	-1,5	0,01	0	0	
4			30	210	20	524	519	2568	750	760	48	47,5						
					0	3	0	0	0	0	0	0	-2	-2,5	0,03	0	0	
5			40	280	25	524	521	2568	749	759	47,5	47						
					0	5	0	1	1	1	-2,5	-3	0,05	3,334	3,334			
6			50	350	30	524	524	2568	749	759	47	46						
					0	8	0	1	1	1	-3	-4	0,08	3,334	3,334			
7			60	420	35	524	527	2568	749	759	46	45						
			0	11	0	1	1	1	-4	-5	0,11	3,334	3,334					

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
8	Б1	01.10.22	70	490	40	524	529	2568	749	759	45	44					
					0	13	0	1	1	-5	-6	0,13	3,334	3,334			
9			80	560	45	525	532	2568	749	759	45	43					
					1	16	0	1	1	-5	-7	0,155	3,334	3,334			
10			90	630	50	525	535	2569	749	759	44	42					
					1	19	1	1	1	-6	-8	0,18	3,334	3,334			
11			100	700	55	526	538	2569	748,5	759	43	41					
					2	22	1	1,5	1	-7	-9	0,205	5	3,334			
12			110	770	60	526	541	2569	748	758,5	42	40					
					2	25	1	2	1,5	-8	-10	0,235	6,667	5			
13			120	840	65	527	544	2569	748	758	41	39					
					3	28	1	2	2	-9	-11	0,26	6,667	6,667			
14			130	910	70	527	548	2569	748	758	40	38					Появление трещин
					3	32	1	2	2	-10	-12	0,3	6,667	6,667			
15			140	980	75	528	553	2569	747,5	757,8	35	36					
					4	37	1	2,5	2,2	-15	-14	0,345	8,334	7,334			
16			150	1050	80	528	565	2569	745	755	34,5	32,5					
					4	49	1	5	5	-15,5	-17,5	0,465	16,667	16,667			
17	160	1120	85	528	576	2570	743,5	753,5	33	31							
			4	60	2	6,5	6,5	-17	-19	0,57	21,667	21,667					
18	170	1190	90	529	585	2570	742	752	31	29							
			5	69	2	8	8	-19	-21	0,655	26,667	26,667					

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
19	Б1	01.10.22	180	1260	95	529,5	593	2570	737	751	29,5	27,5					
							5,5	77	2	13	9	-20,5	-22,5	0,7325	43,334	30	
20			190	1330	100	530	603	2570	731	750	27,5	25					
							6	87	2	19	10	-22,5	-25	0,83	63,334	33,334	
21			200	1400	105	531	621	2570	722	745,5	19,5	17					
							7	105	2	28	14,5	-30,5	-33	1,005	93,334	48,334	
22			210	1470	110	531	633	2570	711	743	16	13					
							7	117	2	39	17	-34	-37	1,125	130	56,667	
23			240	1680	115	532,5	671,5	2571	700,5	737	10	7,5					Перевод тензометров
							8,5	155,5	3	49,5	23	-40	-42,5	1,4975	165	76,667	
24			270	1890	120	534	722	2572	688,5	734	44,5	44					
							10	206	4	61,5	26	-45,5	-48,5	1,99	205	86,667	
25			300	2100	125	535,5	759	2572	680,5	731	39	38					
							11,5	243	4	69,5	29	-51	-54,5	2,3525	231,667	96,667	
26			360	2520	130	538	841,5	2573	663,5	724	28	27					
							14	325,5	5	86,5	36	-62	-65,5	3,16	288,334	120	
27	420	2940	135	541	922	2574	645,5	718	17	15							
					17	406	6	104,5	42	-73	-77,5	3,945	348,334	140			
28	480	3360	140	543	996	2575	626	711	5,5	3,5					Перевод тензометров		
					19	480	7	124	49	-84,5	-89	4,67	413,334	163,334			

Продолжение таблицы 7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
29	Б1	01.10.22	540	3780	145	546,5	1075	2576	597	703	38,5	38						
							22,5	559	8	153	57	-96	-101	5,4375	510	190		
30			600	4200	150	549	1154	2577	571	696	26,5	26						
							25	638	9	179	64	-108	-113	6,21	596,667	213,334		
31			630	4410	155	551	1196,5	2578	555	692	20	19						
							27	680,5	10	195	68	-114,5	-120	6,62	650	226,667		
32			660	4620	160	552,5	1235	2578,5	540	689	14	13						
							28,5	719	10,5	210	71	-120,5	-126	6,995	700	236,667		
33			690	4830	165	554	1277	2579	527	685,5	8	6						
							30	761	11	223	74,5	-126,5	-133	7,405	743,334	248,334		
34			710	4970	170	555,5	1304,5	2579	520	683	3	1,5						
							31,5	788,5	11	230	77	-131,5	-137,5	7,6725	766,667	256,667		
35			720	5040	175	557	1320	2580	513	682	0,5	-1,5						
							33	804	12	237	78	-134	-140,5	7,815	790	260		
36	250	0	180	537	675,5	2571,5	429	746	19	20,5								
							13	159,5	3,5	321	14		1,5125		46,667	Остаточная деформация без нагрузки		

Таблица 8 – Протокол проведения испытания образца балки со сферическими пустотообразователями

№ ступени нагружения	Маркировка образца	Дата испытания	D, 1 ед.=7 кг	Нагрузка, кг	t, мин	П1, мм	П2, мм	П3, мм	М1, мм	М2, мм	T1 × 10 ⁻⁵	T2 × 10 ⁻⁵	Прогиб (П2-(П1+П3)/2)	Деформация относительная (M1 × 10 ⁵)	Деформация относительная (M2 × 10 ⁵)	Примечание	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
0	Б2	15.10.22	0	0	0	5632,5	5676,5	5818,5	600	600	50	50				Начальный отсчет	
					0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
1			5	35	5	5632,5	5678	5815,5	600	600	49,5	50					
					0	1,5	-3	0	0	0	-0,5	0	0,03	0	0		
2			10	70	10	5632,5	5678	5818,5	600	600	49,5	50					
					0	1,5	0	0	0	0	-0,5	0	0,015	0	0		
3			20	140	15	5630,5	5681	5818,5	600	599	48	49,5					
					-2	4,5	0	0	1	-2	-0,5	0,055	0	3,334			
4			30	210	20	5633	5684	5819	599,5	599	47	49					
					0,5	7,5	0,5	0,5	1	-3	-1	0,07	1,667	3,334			
5			40	280	25	5633	5687	5819	599,5	599	46,5	48					
					0,5	10,5	0,5	0,5	1	-3,5	-2	0,1	1,667	3,334			
6			50	350	30	5633,5	5690	5819	599	598,5	45,5	47,5					
					1	13,5	0,5	1	1,5	-4,5	-2,5	0,1275	3,334	5			
7			60	420	35	5634	5693	5819	599	598	45	47					
			1,5	16,5	0,5	1	2	-5	-3	0,155	3,334	6,667					

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
8	Б2	15.10.22	70	490	40	5634,5	5697,5	5819,5	598,5	598	43,5	46						
							2	21	1	1,5	2	-6,5	-4	0,195	5	6,667		
9																		
10																		Появление трещин
11																		
12																		
13																		
14																		
15																		
16																		
17																		
18																		
19																		

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17		
20	Б2	15.10.22	190	1330	100	5639,5	5847,5	5822	575,5	575	17,5	23						
					7	171	3,5	24,5	25	-32,5	-27	1,6575	81,667	83,334				
21					200	1400	105	5639,5	5858	5822	574	573,5	16	21,5				
								7	181,5	3,5	26	26,5	-34	-28,5	1,7625	86,667	88,334	
22					210	1470	110	5640	5878	5822	573	572	14	20				
								7,5	201,5	3,5	27	28	-36	-30	1,96	90	93,334	
23					240	1680	115	5641	5913,5	5822	569	567,5	9,5	16				
								8,5	237	3,5	31	32,5	-40,5	-34	2,31	103,334	108,334	
24					270	1890	120	5641,5	5961	5822,5	565	562	4,5	12				Перевод тензометров
								9	284,5	4	35	38	-45,5	-38	2,78	116,667	126,667	
25					300	2100	125	5642,5	5997	5823	561	557,5	45	45				
								10	320,5	4,5	39	42,5	-50,5	-43	3,1325	130	141,667	
26					360	2520	130	5644	6073	5823,5	554	548,5	35	36,5				
								11,5	396,5	5	46	51,5	-60,5	-51,5	3,8825	153,334	171,667	
27					420	2940	135	5646	6149	5824	546	539,5	25	28				
								13,5	472,5	5,5	54	60,5	-70,5	-60	4,63	180	201,667	
28					480	3360	140	5647,5	6232,5	5824	540	530	15,5	19				
								15	556	5,5	60	70	-80	-69	5,4575	200	233,334	
29					510	3570	145	5649	6271	5825	535,5	525,5	11	14				
								16,5	594,5	6,5	64,5	74,5	-84,5	-74	5,83	215	248,334	
30			540	3780	150	5649,5	6307	5825	532	521	5,50	10						
						17	630,5	6,5	68	79	-90	-78	6,1875	226,667	263,334			
31			550	3850	155	5650	6324	5825	530,5	519	3,5	8						
						17,5	647,5	6,5	69,5	81	-92	-80	6,355	231,667	270			
32			560	3920	160	5650,5	6337,5	5825	529,5	517,5	1,50	6,5						
						18	661	6,5	70,5	82,5	-94	-81,5	6,4875	235	275			

Продолжение таблицы 8

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
33	Б2	15.10.22	580	4060	175	5651	6364,5	5825	527	512							
							18,5	688	6,5	73	88	-50	-50	6,755	243,334	293,334	
34			600	4200	180	5651,5	6387	5825	525	509							
							19	710,5	6,5	75	91	-50	-50	6,9775	250	303,334	
35			610	4270	185	5652	6404	5825,5	523,5	507,5							
							19,5	727,5	7	76,5	92,5	-50	-50	7,1425	255	308,334	
36			0	0	190	5639	5837	5822	585	521							
						6,5	160,5	3,5	15	79			1,065			Остаточная деформация без нагрузки	

3.2 Анализ результатов испытаний

Для определения несущей способности балки сплошного сечения и балки со сферическими пустотообразователями по нормальному сечению к продольной оси элемента воспользуемся методикой расчета пункта 8 СП 63.13330.2018 [22].

Результаты расчета занесены в таблицу 9.

Таблица 9 – Результат расчета несущей способности испытываемых балок

Поз.	Маркировка образца	Предельный изгибающий момент, M_{ult} , кН×кг	Нагрузка, N, кг	Момент образования трещин, M_{cr} , кН×кг	Высота сжатой зоны бетона, x , мм
1	Б1	1064	4148	196	12,5
2	Б2	1037	4256	188	12,5

Произведен расчет прочности нормального сечения железобетонного элемента к продольной оси. Для расчета, по результатам испытания призм, сопротивление бетона на сжатие было принято равным 41,7 МПа.

По полученным результатам можно заметить, что высота сжатой зоны x бетона одинакова для обеих балок, но предельный изгибающий момент для балки со сферическими пустотообразователями составляет 97,5% изгибающего момента балки сплошного сечения. Это может объясняться тем, рабочая высота h_0 элемента уменьшилась, из-за смещения одного из стержней продольной рабочей арматуры балки со сферическими пустотообразователями. Так же, у балки со сферическими пустотообразователями момент образования трещин наступает на 96% момента образования трещин для балки сплошного сечения, что может свидетельствовать о чуть меньшей трещиностойкости балки со сферическими пустотообразователями.

Сравнение полученных результатов испытания балок

Все испытываемые образцы балок в ходе испытания были доведены до разрушения при достижении деформаций продольной рабочей арматуре 250×10^5 . Самую большую нагрузку выдержал образец балки сплошного сечения. Во всех образцах балок прослеживался одинаковый характер разрушения: увеличение ширины и высоты нормальных трещин в середине пролета, а также наклонных трещин в крайних третях пролета.

Для балки со сферическими пустотообразователями характерно большее количество наклонных трещин в крайних третях пролета.

Данные результатов испытаний приведены в сводной таблице 10.

Таблица 10 – Сводная таблица результатов испытаний

№ ступени нагружения	Нагрузка, кг		Изгибающий момент, кг×м		Прогиб, f, мм		Деформации арматуры, $\varepsilon_s \times 10^5$		Деформации бетона, $\varepsilon_b \times 10^5$	
	N ^{Б1}	N ^{Б2}	M ^{Б1}	M ^{Б2}	f ^{Б1}	f ^{Б2}	M ^{Б1} _{ср}	M ^{Б2} _{ср}	T ^{Б1} _{ср}	T ^{Б2} _{ср}
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	35	35	8,75	8,75	0	0,03	0	0	0	-0,25
2	70	70	17,5	17,5	0	0,015	0	0	-0,5	-0,25
3	140	140	35	35	0,01	0,055	0	1,667	-1,25	-1,25
4	210	210	52,5	52,5	0,03	0,07	0	2,5	-2,25	-2
5	280	280	70	70	0,05	0,1	3,334	2,5	-2,75	-2,75
6	350	350	87,5	87,5	0,08	0,1275	3,334	4,1667	-3,5	-3,5
7	420	420	105	105	0,11	0,155	3,334	5	-4,5	-4
8	490	490	122,5	122,5	0,13	0,195	3,334	5,834	-5,5	-5,25
9	560	560	140	140	0,155	0,2275	3,334	9,1667	-6	-6,25
10	630	630	157,5	157,5	0,18	0,3575	3,334	22,5	-7	-10,5
11	700	700	175	175	0,205	0,41	4,167	27,5	-8	-13
12	770	770	192,5	192,5	0,235	0,5825	5,834	31,667	-9	-13,5
13	840	840	210	210	0,26	0,76	6,667	35	-10	-15
14	910	910	227,5	227,5	0,3	0,8375	6,667	39,167	-11	-16,5
15	980	980	245	245	0,345	1,065	7,834	60	-14,5	-22,5
16	1050	1050	262,5	262,5	0,465	1,155	16,667	64,167	-16,5	-23,75
17	1120	1120	280	280	0,57	1,2325	21,667	69,167	-18	-25,5
18	1190	1190	297,5	297,5	0,655	1,3325	26,667	73,334	-20	-25,5
19	1260	1260	315	315	0,7325	1,46	30	77,5	-21,5	-28,5
20	1330	1330	332,5	332,5	0,83	1,6575	33,334	82,5	-23,75	-29,75
21	1400	1400	350	350	1,005	1,7625	48,334	87,5	-31,75	-31,25
22	1470	1470	367,5	367,5	1,125	1,96	56,667	91,667	-35,5	-33

Продолжение таблицы 10

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
23	1680	1680	420	420	1,4975	2,31	76,667	105,834	-41,25	-37,25
24	1890	1890	472,5	472,5	1,99	2,78	86,667	121,667	-47	-41,75
25	2100	2100	525	525	2,3525	3,1325	96,667	135,834	-52,75	-46,75
26	2520	2520	630	630	3,16	3,8825	120	162,5	-63,75	-56
27	2940	2940	735	735	3,945	4,63	140	190,834	-75,25	-65,25
28	3360	3360	840	840	4,67	5,4575	163,334	216,667	-86,75	-74,5
29	3780	3570	945	892,5	5,4375	5,83	190	231,667	-98,5	-79,25
30	4200	3780	1050	945	6,21	6,1875	213,334	245	-110,5	-84
31	4410	3850	1102,5	962,5	6,62	6,355	226,667	250,834	-117,25	-86
32	4620	3920	1155	980	6,995	6,4875	236,667	255	-123,25	-87,75
33	4830	4060	1207,5	1015	7,405	6,755	248,334	268,334	-129,75	-
34	4970	4200	1242,5	1050	7,6725	6,9775	256,667	276,667	-134,5	-
35	5040	4270	1260	1067,5	7,815	7,1425	260	281,667	-137,25	-

Для наглядности, значения прогибов указаны в миллиметрах. Относительные деформации, снятые по мессурам, были перенесены в таблицу с увеличением в 10^5 раз, подсчитано их среднее значение. Для балки сплошного сечения данные мессуры М1 с 19 шага не учитываются.

Для балки сплошного сечения появление первых трещин произошло на 14 шаге нагружения, что соответствует изгибающему моменту 227,5 кг×м.

На 19 шаге нагружения, что соответствует изгибающему моменту 315 кг×м, мессура М1 задела испытательную установку – последующие данные в расчет не принимались.

Разрушение зафиксировано по мессуре М1 между 33 и 34 шагами нагружения, что соответствует изгибающему моменту 1214,5 кг×м, относительные деформации продольной арматуры достигли 250×10^5 .

Для балки со сферическими пустотообразователями появление первых трещин произошло на 10 шаге нагружения, что соответствует изгибающему моменту 157,5 кг×м.

При этом, на 15 шаге нагружения, соответствующий изгибающему моменту 245 кг×м, на боковых поверхностях испытываемой балки, в местах расположения пустотообразователей, появились наклонные трещины.

Разрушение зафиксировано между 30 и 31 шагами нагружения, что соответствует изгибающему моменту 960 кг×м, относительные деформации продольной арматуры достигли 250×10^5 .

Проанализировав характер распределения деформаций арматуры и бетона, а также величину прогибов для балок сплошного сечения и балок со сферическими пустотообразователями, подготовлена диаграмма зависимости прогибов от изгибающих моментов (рисунок 30). Также подготовлены диаграммы с зависимостью средних деформаций арматуры растянутой зоны (рисунок 31) и деформаций бетона сжатой зоны (рисунок 32) от изгибающего момента.

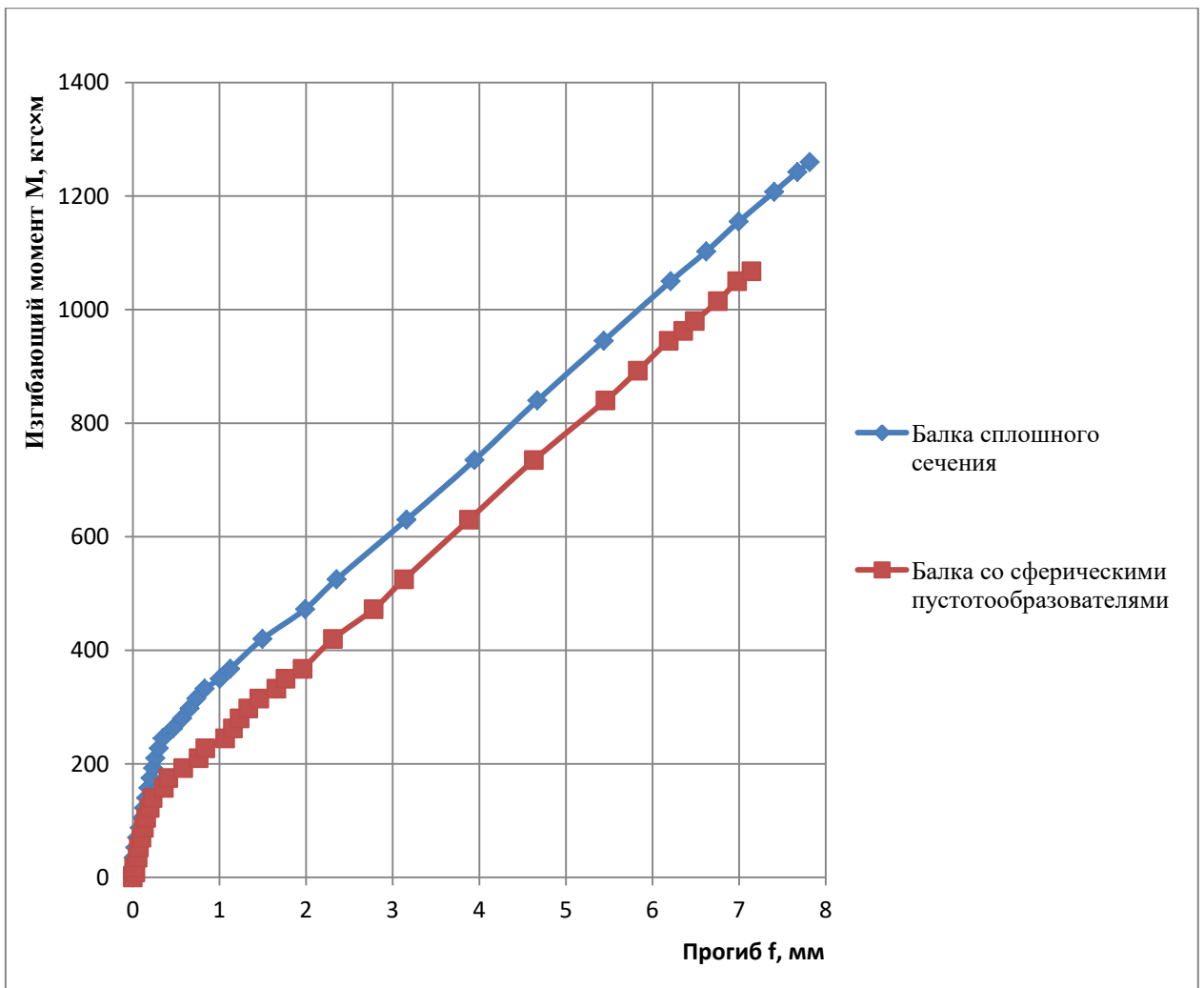


Рисунок 30 – Значения показаний прогибмеров испытываемых балок в зависимости от изгибающих моментов

При рассмотрении диаграммы зависимости прогибов от изгибающего момента можно обратить внимание на то, что прогибы нарастают равномерно, но для балки со сферическими пустотообразователями, по сравнению со сплошной балкой, при том же изгибающем моменте, величина прогиба выше.

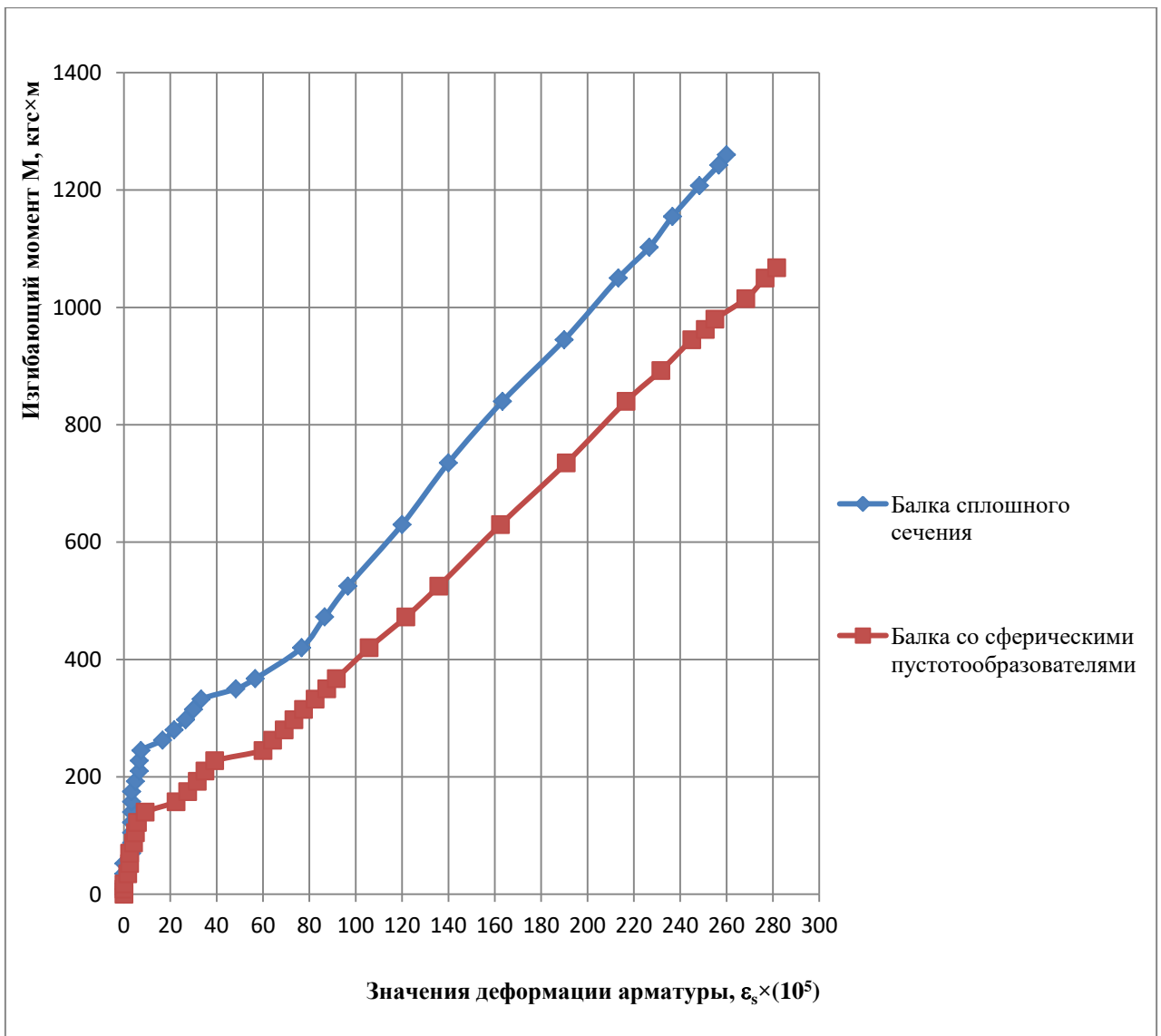


Рисунок 31 – Значения деформаций арматуры испытываемых балок в зависимости от изгибающих моментов

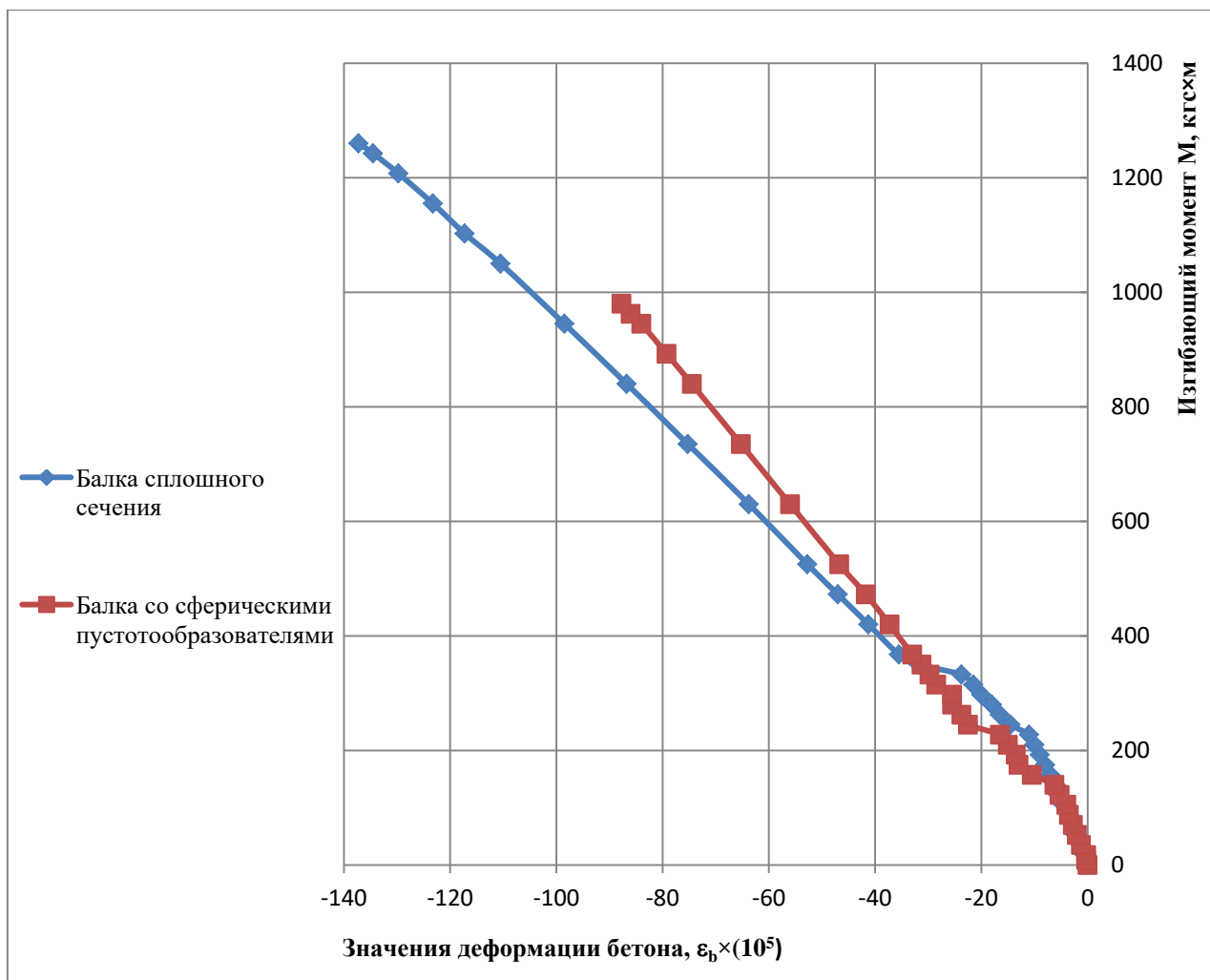


Рисунок 32 – Значения деформаций бетона испытываемых балок в зависимости от изгибающих моментов

При рассмотрении диаграмм зависимости деформаций арматуры и бетона от изгибающего момента можно обратить внимание, что на диаграммах для балки со сферическими пустотообразователями присутствуют 2 горизонтальных участка деформаций, что соответствует шагу 10 – появление первых трещин и шагу 15 – появления наклонных трещин в крайних третях элемента, в местах расположения сферических пустот.

Для сравнительного анализа были взяты шаг нагружения 29 для балки сплошного сечения и шаг 30 для балки со сферическими пустотообразователями, что изгибающему моменту 945 кг×м (таблица 11).

Таблица 11 – Сравнение данных испытанных балок

Поз.	Изгибающий момент, М	Прогиб, f		Деформации арматуры, $\varepsilon_s \times 10^5$		Деформации бетона, $\varepsilon_b \times 10^5$	
	кг×м	мм	%	Без размерности	%	Без размерности	%
Б1	945	5,44	100	190	100	-98,5	117
Б2		6,19	113,8	245	129	-84	100

В результате сравнения данных можно сказать, что:

- для балки со сферическими пустотообразователями прогиб при равной нагрузке на 13,8% больше, чем у балки сплошного сечения;
- деформации арматуры в балке со сферическими пустотообразователями на 29% выше, чем у балки сплошного сечения;
- деформации бетона балки сплошного сечения на 17% выше, при равной нагрузке, чем у балки со сферическими пустотообразователями.
- фактический момент образования трещин для балки со сферическими пустотообразователями наступил на 56% нагрузки для балки сплошного сечения, что может свидетельствовать меньшей трещиностойкости.

Здесь можно сделать вывод о том, что по образованию трещин изгибаемый железобетонный элемент со сферическими пустотообразователями предпочтительнее железобетонного элемента сплошного сечения, так как его разрушение можно заметить на раннем этапе. Трещиностойкость меньше, то есть, по появлению и количеству трещин

можно раньше предпринять меры по предотвращению обрушения конструкции, что положительно скажется на сроке службы здания или сооружения.

При сравнении данных, полученных при испытании и в результате расчета, можно сделать следующие выводы:

- момент образования трещин для балки со сферическими пустотообразователями наступил при 85% расчетного изгибающего момента появления трещин;
- момент образования трещин балки сплошного сечения превысил расчетный на 16%;
- момент разрушения для балки со сферическими пустотообразователями наступил при 93% от расчетного предельного изгибающего момента;
- момент разрушения для балки сплошного сечения превысил на 14% расчетного предельный изгибающий момент.

Можно сказать, что балка со сферическими пустотообразователями уступает балке сплошного сечения по ключевым параметрам, а именно: прочность, жесткость и трещиностойкость. Для применения данной технологии в строительстве требуется дальнейшее ее изучение.

Рекомендации по применению сферических пустотообразователей в изгибаемых железобетонных элементах

Данное решение применительно для монолитных плит перекрытия, например, многоквартирных жилых домов. Оно позволит снизить общий вес перекрытия, как следствие, уменьшить нагрузки на нижележащие конструкции (колонны, пилоны, фундаменты), а также позволит улучшить такие важные критерии для жилого здания, как энергоэффективность и звукоизоляцию. Снижение общего объема бетона здания ведет за собой и снижение выбросов CO^2 при производстве цемента [5].

Выводы по третьей главе

В результате разработанной во второй главе магистерской диссертации программы экспериментальных исследований испытываемых образцов были выполнены следующие задачи:

- проведены испытания балок;
- произведен анализ полученных экспериментальных данных;
- предложена рекомендация по применению в изгибаемых железобетонных элементах сферических пустотообразователей.

Заключение

По ходу выполнения магистерской диссертации были выполнены поставленные задачи, сделаны следующие выводы:

- разработана конструкция облегченного изгибаемого железобетонного элемента со сферическими пустотообразователями;
- замена объема бетона шарообразными пустотообразователями из пенополистирола повлекла за собой уменьшение массы железобетонной балки со сферическими пустотообразователями и составила 77 кг, что на 23 кг (23%) меньше железобетонной балки сплошного сечения массой 100 кг;
- появление первых трещин у железобетонной балки со сферическими пустотообразователями произошло при изгибающем моменте 157,5 кг×м, что составляет 56,3% от изгибающего момента балки сплошного сечения – 280 кг×м, что может свидетельствовать о меньшей жесткости и трещиностойкости элемента со сферическими пустотообразователями;
- момент образования трещин для балки со сферическими пустотообразователями наступил при 84% расчетного момента образования трещин;
- разрушение балки со сферическими пустотообразователями произошло при изгибающем моменте 960 кг×м, что составляет 79% от изгибающего момента балки сплошного сечения, равному 1214,5 кг×м, что может свидетельствовать о меньшей прочности элемента со сферическими пустотообразователями;
- момент разрушения для балки со сферическими пустотообразователями наступил при 93% от расчетного предельного изгибающего момента;
- можно сказать, что применение шарообразных пустотообразователей в изгибаемых железобетонных элементах рационально.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В. Комплексная разработка технологии возведения монолитных конструкций высотных и уникальных зданий // [Электронный ресурс]: учебное пособие; М-во образования и науки Рос. Федерации, Волгогр. гос. техн. ун-т. – Электронные текстовые и графические данные (7,3 Мбайт). – Волгоград: ВолгГТУ, 2018. 148 с.
2. Бай В. Ф., Ротштейн Д. М., Худышкина Н. Ю. О трещиностойкости железобетонных плит перекрытий, изготовляемых способом непрерывного безопалубочного формования В сборнике: Мировая наука и образование в условиях современного общества // Сборник научных трудов по материалам Международной научно-практической конференции: в 4 частях // ООО «АР-Консалт». 2014. С. 102–104.
3. Босаков С. В., Мордич А. И., Карякин А. А., Сонин С. А., Дербенцев И. С. Распределение усилий под нагрузкой в многопустотных плитах сборно-монолитного перекрытия, опертого на несущие стены // Наука и техника. 2019. Т. 18. № 2. С. 93–103.
4. Бугаевский С. А. Современные облегченные железобетонные перекрытия с применением неизвлекаемых вкладышей-пустотообразователей // Науковий вісник будівництва. – 2015. – № 3. 73 с.
5. Булгаков М.Е. Несущая способность железобетонных балок со сферическими пустотообразователями // Студенческие дни науки в ТГУ – 2022. С. 9–11.
6. Голышев А. Б., Бачинский В. Я., Полищук В. П. Железобетонные конструкции. Том I. Сопротивление железобетона, 2001. 419 с.
7. ГОСТ Р 52544-2006. Прокат арматурный свариваемый периодического профиля классов А500С и В500С для армирования железобетонных конструкций. – Введ. 2007-01-01. – М.: Стандартинформ, 2018.

8. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. – Введ. 2019-09-01. – М.: Стандартиформ, 2019.
9. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам (ред. от 01.06.2018). Введ. 2013-07-01. М.: Стандартиформ, 2018.
10. ГОСТ 13015-2012 Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения. – Введ. 2014-07-01. – М.: Стандартиформ, 2018.
11. ГОСТ 18105-2018 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.- Введ. 2020-01-01.- М.: Стандартиформ, 2018.
12. ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – Введ. 2016-04-01. – М.: Стандартиформ, 2016.
13. ГОСТ 24452-80 Бетоны. Методы определения призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – Введ. 1982-01-01. – М.: Стандартиформ, 2016.
14. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2013.
15. Коноплев С. Н. Организация контроля прочности бетона монолитных конструкций по образцам. Часть 1 // [Электронный ресурс] – Электрон. журн. – Москва: Композит XXI век, 2015. – Режим доступа: свободный. – статья в журнале - научная статья (elibrary) . С. 36–39.
16. Коцюра И. П., Деркач Е. А., Шалобыта Н. Н. Экспериментальное исследование балочного фрагмента монолитной многопустотной плиты перекрытия // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2016. Т. 6. № 1. С. 74–81.

17. Маилян Д. Р., Сербиновский П. А., Сербиновский А. В. Конструкция усиления железобетонной многопустотной плиты перекрытия // патент на изобретение RUS № 2610951. Заявка № 2015154410 от 17.12.2015. Оpubл. 17.02.2017. 8 с.
18. Сапожников А. И., Егупов К. А. Работа сборного перекрытия в его плоскости и способы повышения его прочности и жесткости // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 5. С. 54–58.
19. Смоляго Г. А., Дрокин С. В., Дронов А. В., Белоусов А. П., Смоляго Е. Г. Конструктивная безопасность монолитных железобетонных перекрытий по несущей способности и деформативности. Строительство и реконструкция. 2019. № 4 (84). С. 83–92.
20. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (ред. от 28.01.2019). М.: 2016.
21. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменениями N 1, 2, 3). – Введ. 2011-05.20.-М.: Минстрой России, 2011.
22. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Введ. 2019-06-20.- М.: Минстрой России, 2018.
23. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с Изменениями N 1, 3). – Введ. 2013-07-01.- М.: Госстрой, ФАУ «ФЦС», 2013.
24. 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.
25. Хутова Е. Э. Оценка несущей способности, жесткости и трещиностойкости изгибаемых железобетонных элементов, изготовленных на экспериментальном бетоне завода ЖБИ: маг. дис. 08.04.01. Тольятти, 2021. URL: <http://hdl.handle.net/123456789/20339> (дата обращения: 01.06.2022).

26. Bayan S. Al-Nu'man¹ and Caesar S. Abdullah. Modeling Deflection Control of Reinforced Concrete Slab Systems Using Utility Theory and Sensitivity Analysis // Civil Engineering Department, Faculty of Engineering, Ishik University, Erbil, Iraq Structural Engineer. 2018. S. 153–157.

27. Girum Urgessa, Wondwosen Ali and Javad Esfandiari. Macromechanical analysis of spherically voided biaxial concrete slabs // Engineering Proceedings of International Structural Engineering and Construction. 2019. S. 1-5.

28. Hyung Gyun Noh, Hie Chan Kang, Moo Hwan Kim, Hyun Sun Park. Estimation Model for Effective Thermal Conductivity of Reinforced Concrete Containing Multiple Round Rebars // International Journal of Concrete Structures and Materials. 2018. S. 10.

29. R. Sagadevan, B. N. Rao. Effect of void former shapes on one-way flexural behaviour of biaxial hollow slabs // International Journal of Advanced Structural Engineering. 2019. S. 297–307.

30. Seunguk Na, Inkwan Paik, Sung-ho Yun, Huu Chi Truong, Young-Sook Roh. Evaluation of the Floor Impact Sound Insulation Performance of a Voided Slab System Applied to a High-Rise Commercial Residential-Complex Building// International Journal of Concrete Structures and Materials. 2019. S. 10.