

Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal <https://esj.today>

2023, Том 15, № 4 / 2023, Vol. 15, Iss. 4 <https://esj.today/issue-4-2023.html>

URL статьи: <https://esj.today/PDF/04SAVN423.pdf>

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Талантова, К. В. Нетиповая плита перекрытия гражданского здания на основе сталефибробетона /

К. В. Талантова // Вестник евразийской науки. — 2023. — Т. 15. — № 4. — URL:

<https://esj.today/PDF/04SAVN423.pdf>

For citation:

Talantova K.V. Atypical floor slab of a civil building based on steel fiber concrete. *The Eurasian Scientific Journal*.

2023; 15(4): 04SAVN423. Available at: <https://esj.today/PDF/04SAVN423.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.)

УДК 624.011.2 + 620.22:624.19

Талантова Клара Васильевна

ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»,

Санкт-Петербург, Россия

Профессор

Доктор технических наук, доцент

E-mail: talant_bar@mal.ru

РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=718210

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAB-5001-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6508015656>

Нетиповая плита перекрытия гражданского здания на основе сталефибробетона

Аннотация. В современном гражданском строительстве используются различные типы плит перекрытия. В том числе типовые, стабильно занимающие своё место многие годы в практике строительства, обладающие известным набором свойств, и новые нетиповые. В том числе ребристые и многопустотные плиты из тяжелого бетона, плиты типа «bubbledeck» (от американских производителей), железобетонные конструкции с полимерными вкладышами Sobiax, сборно-монолитные плиты с применением ячеистого бетона, так называемый «Rectobeton». При всём многообразии решений, возможности совершенствования плит перекрытия не исчерпаны.

Более ста лет в России и за рубежом ведутся обширные экспериментально-теоретические исследования строительного композита — сталефибробетона, накоплен опыт его применения. Повышенные, по сравнению с традиционным бетоном и железобетоном, физико-механические характеристики сталефибробетона, и, безусловно, высокие его технико-экономические показатели, позволяют рассматривать альтернативные варианты элементов перекрытий гражданских зданий. В частности, обеспечить свободную планировку помещений, в современных гражданских зданиях позволяет принятая конструктивная форма тонкостенных цилиндрических оболочек, объединённых с помощью бортовых элементов в многоволновую плиту. При этом все крутящие моменты, а также изгибающие моменты, действующие в продольном направлении цилиндрических оболочек, и соответствующие им поперечные силы в них пренебрежимо малы, и ими можно пренебречь, учитывая работу оболочек на сжатие.

В статье приведена информация о разработке многоволновой тонкостенной плиты перекрытия на основе сталефибробетона. Представлен численный анализ элемента — полутрубы, выполненный программными средствами, и его результаты, а также результаты

экспериментальной проверки модели многоволновой плиты на основе сталефибробетона в масштабе 1:4, которые показали перспективность предлагаемого решения.

Ключевые слова: форма сечения; элемент-полутруба; многоволновая плита перекрытия; сталефибробетон; заданные характеристики; стальная фибра; численные исследования; физическая модель элемента; технико-экономические показатели

Введение

Предлагаемые на рынках России и зарубежных стран конструкции перекрытий обладают набором характеристик, позволяющих их использовать при действии различных нагрузок и климатических условий. Значительный вес типовых железобетонных элементов перекрытия, с ростом при увеличении пролетов, очевидно, требует поиска направлений его снижения.

В представляемой работе проведены экспериментально-теоретические исследования конструкции перекрытия, в которой совокупность геометрии и используемого композиционного материала — сталефибробетона позволили сократить материалоемкость элементов конструкции, что обеспечило снижение их веса и при больших пролётах, сокращение расхода стали и бетона на 1 м^2 перекрытия, снижение постоянной нагрузки на несущие элементы, в том числе на стены или колонны, и на фундаменты.

1. Материалы и методы

1.1 Исследование формы сечения

Форма элемента разрабатываемой конструкции имеет очертание полутрубы. Конструктивная схема — балка на двух опорах, нагруженная временной полезной равномерно распределённой нагрузкой, в соответствии с нормами равной $2,0 \text{ кН/м}^2$. Объединение элементов-полутруб в единую конструкцию при помощи бортовых элементов дает возможность рассматривать пространственную конструкцию в виде многоволновой цилиндрической оболочки — плиты перекрытия (рис. 7).

Исследования проводятся с целью оценки возможности обеспечения несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации многоволновой плиты перекрытия при снижении материалоемкости конструкции, а значит и её веса, сокращения трудозатрат на изготовление, транспортные расходы, монтаж, а также финансовых затрат и обеспечение надёжности и долговечности решения.

Разрабатывается нетиповая плита перекрытия с пролётами, позволяющими обеспечить свободную планировку помещений. Композиционный материал — сталефибробетон (СФБ), используемый в конструкции, обладает физико-механическими характеристиками, которые можно задать, в соответствии с эксплуатационными требованиями, предъявляемыми к элементам конструкций¹ [1–8].

Для сравнения вариантов элемента-полутрубы, в том числе формы сечения, был выполнен численный анализ 9-ти типов элементов, геометрические характеристики которых приведены в таблице 1. Была поставлена задача проанализировать влияние длины (l) элемента, высоты его сечения (h), стрелы подъема (f) на напряжённо-деформированное состояние

¹ ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости, введен 01.09.2019 взамен ГОСТ 8829-94.

элемента и его перемещения (рис. 4–6) и по результатам анализа выбрать рациональные геометрические характеристики варианта элемента-полутрубы.

Известно, что тонкостенные пространственные конструкции обладают рядом преимуществ по сравнению с плоскостными. Схема поперечного сечения варианта разрабатываемой конструкции многоволновой плиты показана на рисунке 2.

1.2 Численный анализ элемента в форме полутрубы

Для проведения численного анализа элементов-полутруб был принят материал — сталефибробетон, получаемый на основе мелкозернистого бетона группы А, класса по прочности на сжатие В30 с расчётными характеристиками $R_b = 17$ МПа; $R_{bt} = 1,15$ МПа; $E_b = 26 \cdot 10^3$ МПа. Фибра стальная из стали БСт0 по ГОСТ 3282, диаметром $d_f = 0,5$ мм, длиной $l_f = 50$ мм, с отношением длины к диаметру $l_f/d_f = 100$ и объемным процентом армирования $\mu_{fv} = 0,75$ %.

Таблица 1

Геометрические характеристики элемента-полутрубы, принятые в исследованиях

№ п/п	Длина элемента, L, м	Высота сечения, h, мм	Стрела подъема, f, м	Диаметр элемента, D, м
1	6	20	0,5	1,0
2	9	20	0,5	1,0
3	12	20	0,5	1,0
4	6	30	0,3	0,6
5	9	30	0,3	0,6
6	12	30	0,3	0,6
7	6	40	0,2	0,4
8	9	40	0,2	0,4
9	12	40	0,2	0,4

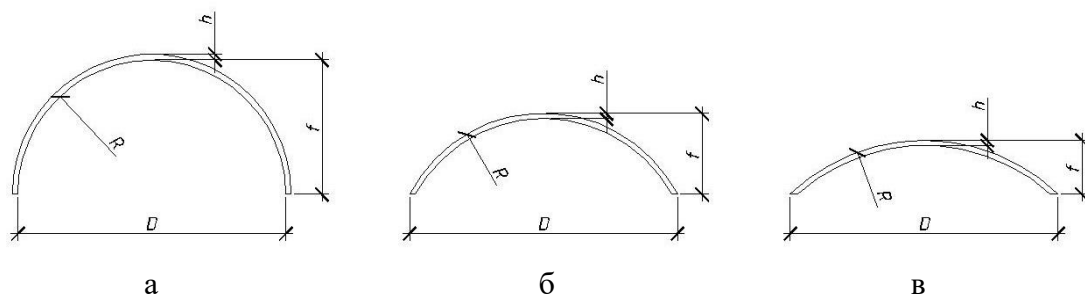


Рисунок 1. Геометрическая схема сечения элемента — полутрубы в таблице 1: (а) строки 1–3; (б) строки 4–6; (в) строки 7–9 (подготовлено автором)

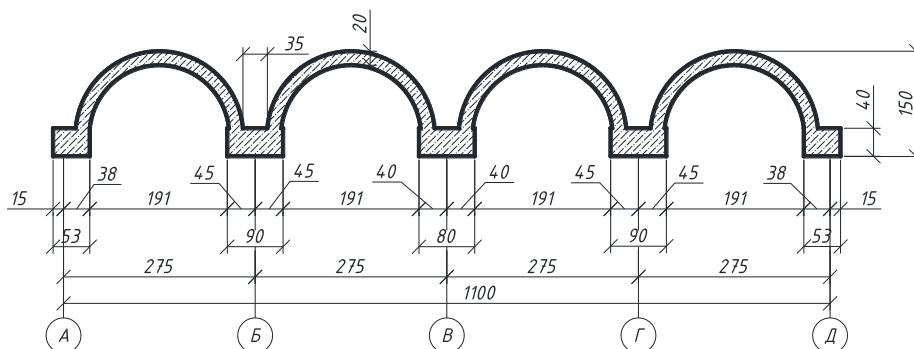


Рисунок 2. Схема поперечного сечения многоволновой плиты перекрытия. Вариант со сферическим очертанием элементов — полутруб (разработано автором)

Модуль деформации сталефибробетона, E_{fb} , был определён по формуле $E_{fb} = \mu_{fv} E_{sf} + (1 - \mu_{fv}) E_b$, для указанного выше объёмного содержания фибр, т. е. коэффициент фибрового армирования составил $\mu_{fv} = 0,0075$, а модуль деформаций² — $E_{fb} = 27,31 \cdot 10^3$ МПа [3; 4]. Здесь E_{sf} , E_b — модули упругости стальной фибры и бетона.

При проведении численных исследований в расчётах конструкции перекрытия были учтены следующие нагрузки. Постоянные: от собственного веса (при плотности сталефибробетона — 2300 кг/м^3 [3]), что составляет — $0,506 \text{ кН/м}^2$; от конструкции пола и теплоизоляции — $0,50 \text{ кН/м}^2$. Временная полезная³ расчётная — $2,1 \text{ кН/м}^2$.

Численный анализ элемента — полутрубы выполнен в программном комплексе «ЛИРА», реализующем метод конечных элементов (МКЭ). Конструктивный элемент (рис. 3) описан универсальным треугольником КЭ оболочка, тип 42. Количество конечных элементов и узлов определялось в зависимости от геометрических характеристик элемента.

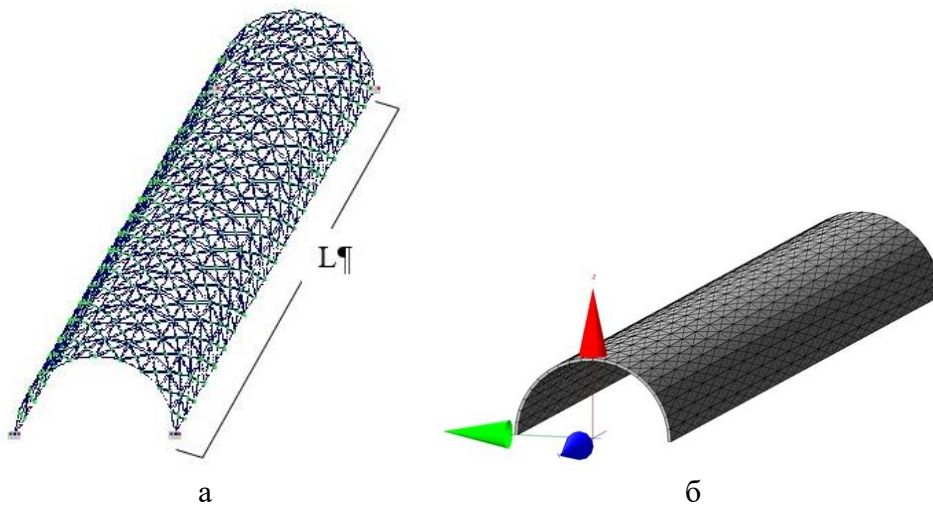


Рисунок 3. Схемы к расчёту элемента перекрытия, полученные средствами ВК SCAD: (а) визуализация элемента перекрытия — полутрубы; (б) геометрическая схема элемента (подготовлено автором)

1.3 Результаты численного анализа

Результаты численного анализа приведены на рисунках 4–6. Как следует из графиков более предпочтительным является элемент — полутруба со стрелой подъёма $f = 0,5$ м сферического очертания длиной 6 м. При увеличении его длины до 12 м наблюдается существенный рост напряжений сжатия (σ_c) почти в 6 раз, но на 13 % ниже σ_c элемента со стрелой подъёма 0,3 м и на 31 %, со стрелой подъёма 0,2 м (рис. 4). Для элемента со стрелой подъёма 0,5 м при увеличении его длины до 12 м рост напряжений растяжения, σ_t , по сравнению с длиной 6 м, составил — 2,6 раза, а для элементов с $f = 0,3$ м — 2,9 раза. В то же время, для элемента с $f = 0,2$ м напряжения растяжения (σ_t) в 4,7 раза превышают аналогичные напряжения двух других рассматриваемых вариантов (рис. 5).

² Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций. — М.: НИИЖБ Госстроя СССР. 1987. — 148 с.

³ СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия: актуализированная ред. СНиП 1.01.07-85*; введ. 2017-06-04. — Текст: электронный // Техэксперт. Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов.

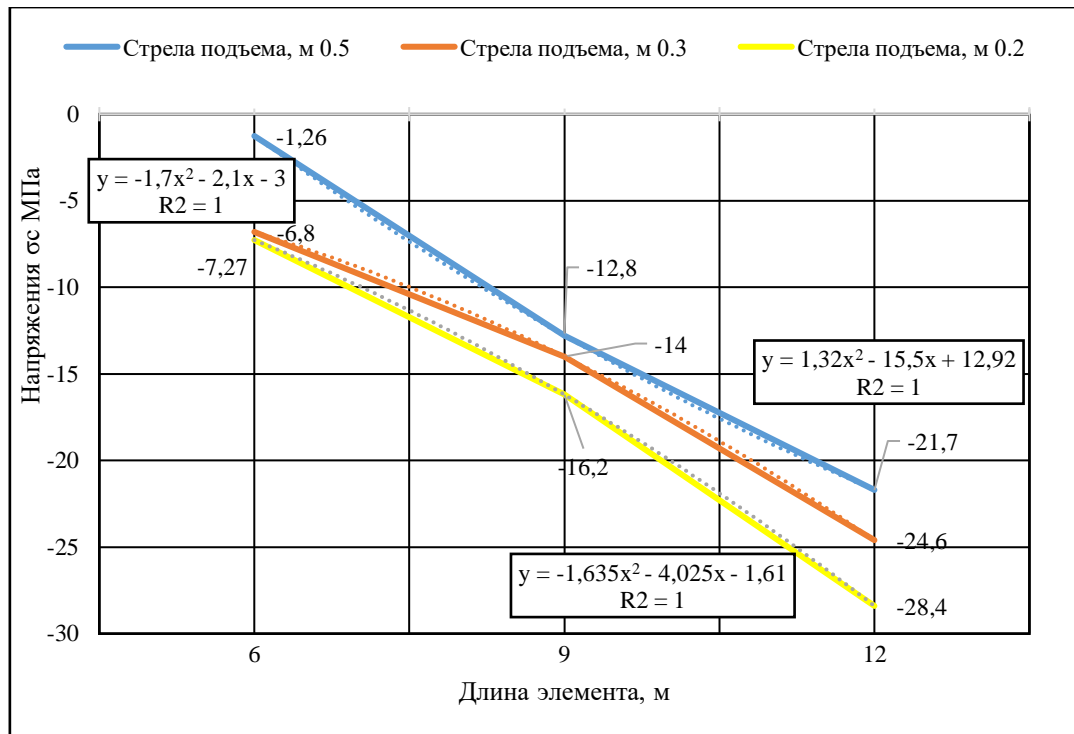


Рисунок 4. Зависимость напряжений $N3(-)$ от стрелы подъема и длины элемента (разработано автором)

Увеличение высоты сечения элемента (h) в 2 раза и уменьшение его диаметра (D) на 60 % привело (табл. 1, рис. 1), помимо прочего, к резкому росту напряжений (σ_t и σ_c) и перемещений.

При этом перемещения элементов — полутруб длиной 6 м со стрелами подъёма 0,3 и 0,2 м близки, для элемента со стрелой подъёма 0,5 м перемещения в 4,5 раза ниже других вариантов (рис. 6).

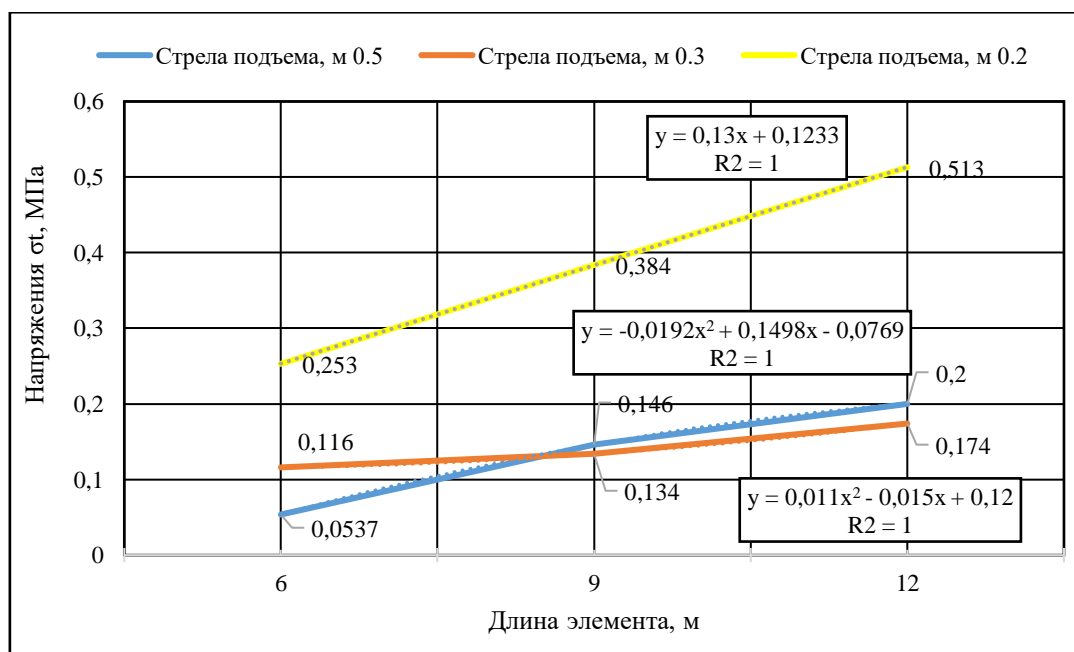


Рисунок 5. Зависимость напряжений $N3(+)$ от стрелы подъема и длины элемента (разработано автором)

Однако при увеличении длины элемента со стрелой подъёма 0,5 м до 12 м отмечается их значительный рост, но наименьший в сравнении с другими рассматриваемыми вариантами. В общем случае перемещения растут при увеличении длины элемента со скачком для элемента с минимальным диаметром и максимальной высотой сечения (рис. 6).

Рассматриваемые показатели элементов — полутруб длиной 9 м ориентировочно можно оценить, как средние между показателями элементов длиной 6 и 12 м.

Таким образом, численный анализ показал, что наиболее предпочтительным является вариант элемента-полутрубы сферического очертания со стрелой подъёма 0,5 м и высотой сечения 20 мм.

Варьирование таких параметров, как класс исходного бетона, объемный коэффициент фибрового армирования, тип стальной фибры, наличие преднапряжённой регулярной арматуры позволит обеспечить увеличение пролета и уменьшение стрелы подъёма элемента [10]. Дальнейшие исследования планируется направить на поиск рациональных решений, позволяющих увеличить длину элемента перекрытия, после экспериментальной проверки разрабатываемой многоволновой плиты.

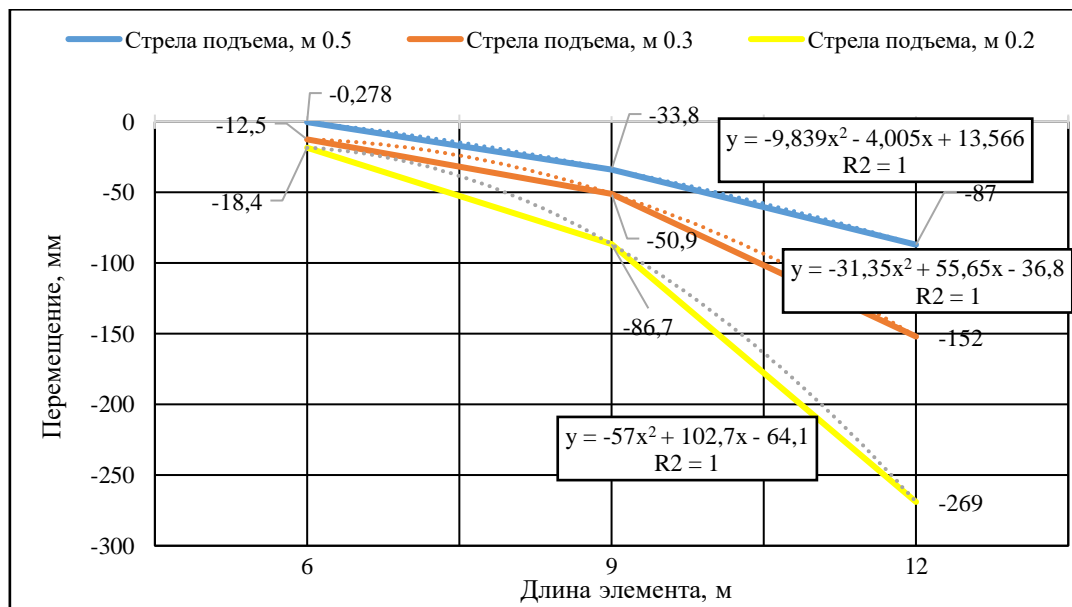


Рисунок 6. Зависимость перемещений от стрелы подъёма и длины элемента (разработано автором)

2. Экспериментальные исследования модели многоволновой плиты перекрытия

С целью экспериментальной проверки целесообразности применения многоволновой плиты в качестве конструкции перекрытия в практике строительства в соответствии с нормами¹ были выполнены постановочные экспериментальные исследования её модели [9].

Для этого средствами ВК ЛИРА был выполнен статический расчёт и запроектирована модель многоволновой плиты перекрытия с использованием элементов — полутруб со стрелой подъёма 0,5 м сферического очертания, как наиболее предпочтительный из рассматриваемых в рамках численного анализа, с размерами на плане 6,00 м на 4,00 м, в масштабе $m = 1:4$.

В соответствии с результатами статического расчета и полученных напряжений (усилий) были подобраны параметры фибрового армирования, в соответствии с которым по специальной методике был запроектирован состав СФБ смеси и выполнен её подбор [3]. В

экспериментальных исследованиях была использована стальная листовая фибра по ТУ 21-33-60-87, $d_f = 0,48$ мм; $l_f = 24,33$ мм; с объемным содержанием $\mu_{fv} = 0,75$ %, что составляет 58,5 кг на 1 м^3 СФБ смеси. Для модели многоволновой плиты размерами на плане $1,0 \times 1,5$ м требуется объём СФБ смеси $0,045 \text{ м}^3$, с расходом стальной фибры 2,63 кг.



Рисунок 7. Модель многоволновой плиты перекрытия из сталефибробетона при подготовке к испытаниям статическими нагрузками (фото автора)

Изготовление модели многоволновой плиты было выполнено в предварительно разработанной и изготовленной экспериментальной нестандартной опалубке, с использованием которой были отформованы элементы — полутрубы со сферическим очертанием, которые затем были объединены в конструкцию многоволновой плиты при помощи бортовых элементов, заармированных, в соответствии с расчётом, помимо фибровой регулярной арматурой по $1\varnothing 5 \text{ Вр } 500$ в каждом бортовом элементе полутрубы, в том числе в средних по $2\varnothing 5$, то есть $8\varnothing 5 \text{ Вр } 500$ в модели. Испытания статическими нагрузками проводились на специально смонтированном стенде по балочной схеме (рис. 7).

Загружение модели выполнялось в соответствии с разработанным на основе расчёта режимом испытаний, определены контрольные нагрузки по прочности, трещиностойкости и жёсткости, а также величина ступени загрузки, равная 5 % от расчётной нагрузки по несущей способности (100 кг).

В процессе загрузки по достижении контрольной нагрузки по трещиностойкости 1 500 кг (15 кН) на элементах модели трещины не появились, прогиб составил 1,09 мм, что менее расчетного прогиба, равного 6 мм.

При приложении расчетной контрольной нагрузки по несущей способности 2 000 кг (20 кН) признаков разрушения модели обнаружено не было. Далее по техническим причинам была проведена разгрузка модели ступенями, кратно ступеням загрузки.

Заключение

Численный анализ показал, что многоволновая плита может работать в пролетах до 12 м со стрелой подъема равной половине диаметра полутрубы, с пролетами менее 12 м целесообразно уменьшать высоту стрелы подъема. Техничко-экономические показатели (ТЭП) 1 м² разрабатываемой многоволновой плиты перекрытия со сферическим очертанием: объём сталефибробетона 0,03 м³, вес 70 кг/м² (против 250–300 до 700 кг/м² типовых конструкций⁴); расход стали: фибры 2,63 кг, проволоки Ø5Вр 500 — 1,23 кг.

При выполнении прямого расчёта по общепринятой методике не была учтена деформативность (сжимаемость и растяжимость) сталефибробетона и её упругая составляющая, которая по результатам исследований выше, чем у бетона и достигает 60...70 % от полной деформативности, в то время как для бетона она оценивается в 25...30 % [9; 10]. В конструктивном расчёте не была учтена способность сталефибробетона поглощать энергию и его высокая упругая составляющая деформаций.

Обратный расчёт, выполненный с определением момента сечения плиты, показал, что контрольная нагрузка по несущей способности может достичь 51 кН, а разрушающая с учётом коэффициента запаса 1,4–71 кН.

В результате выполненных экспериментально-теоретических исследований была проверена перспективность разрабатываемого варианта элемента перекрытия на основе строительного композита — сталефибробетона.

По результатам экспериментально-теоретических исследований был получен патент на изобретение РФ «Плита перекрытия».⁵ Рос. Федерация № 2768223 С1, МПК E04B 1/06 от 23.03.22.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лысенко Е.Ф., Гетун Г.В. Проектирование сталефиброжелезобетонных конструкций. — Киев: УМК ВО, 1989 — 184 с.
2. Лобанов, И.А. Особенности структуры и свойства дисперсно-армированных бетонов / И.А. Лобанов // Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов: межвуз. тем. сб. тр. — Л., 1986. — С. 5–10.

⁴ ГОСТ 26434-2015. Плиты перекрытий железобетонные для жилых зданий. Типы и основные параметры, введ. 2017-01-01: М.: Стандартинформ, 2019.

ГОСТ 9561-2016. Плиты перекрытий железобетонные многопустотные для зданий и сооружений. Технические условия, введ. 2017-06-01 — М.: Стандартинформ, 2016.

⁵ Плита перекрытия. Патент RU 2768223 С1, М0,5ПК E04B 1/06 (2021.08) № 2021119729; от 23.03.22. Бюл. № 9. Талантова К.В., Михеев Н.М., Веселов В.В., Скориков А.А.

3. Сталефибробетон и конструкции на его основе / К.В. Талантова, Н.М. Михеев — СПб: ФГБОУВПО ПГУПС, 2014. — 276 с.
4. Ермилов Ю.И. Тонкостенные сталефибробетонные конструкции в гражданском строительстве: обзор. информ. / Ю.И. Ермилов; ЦНТИ по гражд. строительству и архитектуре. — М., 1987. — 55 с. (Конструкции жилых и общественных зданий. Технология индустриального домостроения; вып. 10).
5. Dratkobetonove konstrukce. Smernice pro navrhovany, provadeny, kontrolu vyroby a zkouseni dratkobetonovych konstrukci. — Praha. — 1999. — Technical Manual. — 107 p.
6. Ольховая Л.И. Свойства сталефибробетона при кратковременном растяжении / Л.И. Ольховая; Кишинев. политехн. ин-т. Кишинев, 1989. — 29 с. — Библиогр. 4 назв. — Деп. МолдНИИНТИ 24.03.89, № 1096-М89.
7. Талантова К.В. Создание элементов конструкций с заданными свойствами на основе сталефибробетона / К.В. Талантова // Известия вузов. Строительство. — Новосибирск, 2008. — № 10. — С. 4–9.
8. Зива А.Г. Деформативность, трещиностойкость и раскрытие трещин в изгибаемых предварительно напряжённых изгибаемых элементах с применением сталефибробетона / А.Г. Зива, Б.В. Соловьёв // Исследования по строительной механике и строительным конструкциям: сб. науч. тр. — Челябинск, 1978 — С. 111–113.
9. Поляков Л.П., Файнбурд В.М. Моделирование строительных конструкций, Киев: Будивельник, 1975.
10. Талантова К.В. Обеспечение свойств элементов конструкций на основе сталефибробетона с учетом влияния характеристик стальных фибр / К.В. Талантова, Э.И. Вингисаар // Известия вузов. Строительство. — Новосибирск, 2008 — № 11-12. — С. 123–129.

Talantova Klara Vasilievna

Petersburg State Transport University of Emperor Alexander I, Saint Petersburg, Russia

E-mail: talant_bar@mail.ru

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=718210

WoS: <https://www.webofscience.com/wos/author/rid/AAB-5001-2019>

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=6508015656>

Atypical floor slab of a civil building based on steel fiber concrete

Abstract. In modern civil engineering, various types of floor slabs are used. Including standard ones, which have been steadily occupying their place for many years in construction practice, possessing a known set of properties, and new non-standard ones. Including ribbed and multi-hollow slabs made of heavy concrete, bubbledeck slabs (from American manufacturers), reinforced concrete structures with Cobiax polymer inserts, prefabricated monolithic slabs using cellular concrete, the so-called «Rectobeton». With all the variety of solutions, the possibilities for improving floor slabs have not been exhausted.

For more than a hundred years in Russia and abroad, extensive experimental and theoretical studies of the building composite — steel fiber reinforced concrete have been carried out, experience has been gained in its application. Increased, in comparison with traditional concrete and reinforced concrete, physical and mechanical characteristics of steel fiber reinforced concrete, and, of course, its high technical and economic indicators, allow us to consider alternative options for floor elements of civil buildings. In particular, the accepted constructive form of thin-walled cylindrical shells, combined with the help of side elements into a multi-wave plate, allows to provide a free layout of premises in modern civil buildings. In this case, all torques, as well as bending moments acting in the longitudinal direction of the cylindrical shells, and the corresponding transverse forces in them are negligible, and they can be neglected, taking into account the work of the shells in compression.

The article provides information on the development of a multi-wave thin-walled floor slab based on steel fiber reinforced concrete. A numerical analysis of the half-pipe element, performed by software, and its results, as well as the results of an experimental verification of the model of a multi-wave plate based on steel fiber concrete on a scale of 1:4, which showed the promise of the proposed solution, are presented.

Keywords: section shape; half-pipe element; multi-wave slab; steel fiber reinforced concrete; specified characteristics; steel fiber; numerical studies; physical model of the element; technical and economic indicators