

УДК 624.073.4
EDN: AZMFCX

[https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-100-111](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-100-111)

В.Е. РУСАНОВ¹, П.С. МИЛЬЧЕВСКИЙ¹, С.Р. АЙДАРОВ¹, П.С. МАСЛОВ²

¹ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», ул. Кольская, д. 2, корп. 6, 129329, г. Москва, Российская Федерация

²АО «Северсталь Менеджмент», ул. Клары Цеткин, д. 2, 127299, г. Москва, Российская Федерация

НАТУРНЫЕ ИСПЫТАНИЯ БЕСКАПИТЕЛЬНОЙ СТАЛЕФИБРОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ С КОМБИНИРОВАННЫМ АРМИРОВАНИЕМ

Аннотация

Введение. В практике строительства применение сталефибробетона (СФБ) в бескапительных безригельных плитах перекрытия ограничено, несмотря на его потенциал повышения трещиностойкости и снижения трудоёмкости армирования. В данной работе рассматривается конструкция с комбинированным армированием, сочетающим стальную фибру и локальное стержневое армирование.

Цель. Экспериментально подтвердить работоспособность и несущую способность бескапительной плиты из СФБ с комбинированным армированием на основе натурных испытаний.

Материалы и методы. Испытания выполнены на полноразмерной плите перекрытия локального очистного сооружения в возрасте 30 суток. Использован бетон класса В30 и стальная фибра Hendix® Prime 75/52 в количестве 70 кг/м³. Нагрузка прикладывалась ступенчато в центре пролёта на площадке 1,5 × 3,0 м. Максимальная нагрузка составила 15,5 тс (3,45 тс/м²). Для обоснования эквивалентности нагрузок использовалась конечно-элементная модель и упругий расчёт по первой группе предельных состояний.

Результаты. Установлено, что плита работает упруго до ≈ 65 % максимальной нагрузки. При дальнейшем нагружении наблюдается снижение жёсткости и нелинейный рост прогибов (до 2,10 мм), при этом трещинообразование визуально не выявлено. После разгрузки остаточная деформация составила 0,14 мм.

Выводы. Полученные результаты подтверждают возможность эффективного применения СФБ с комбинированным армированием в бескапительных плитах. Конструкция обеспечивает требуемую несущую способность и трещиностойкость при снижении объёма традиционного армирования, что делает данный подход перспективным для практического применения.

Ключевые слова: сталефибробетон, стальная фибра, бескапительная плита, безригельное перекрытие, комбинированное армирование, натурные испытания, прогиб, трещиностойкость, метод конечных элементов

Для цитирования: Русанов В.Е., Мильчевский П.С., Айдаров С.Р., Маслов П.С. Натурные испытания бескапительной сталефибробетонной плиты с комбинированным армированием // *Бетон и железобетон*. 2026. № 3. С. 100–111. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-100-111](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-100-111) EDN: AZMFCX

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности

Авторы выражают благодарность ООО «ПСО-733» за возможность реализации опытной конструкции и организацию натурных испытаний, ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации», ОАО «Северсталь-метиз» и ООО «Русфибра-ТС» за участие в квалифицированной организации и технологическом сопровождении подготовки эксперимента и выполнения работ.

Поступила в редакцию 06.05.26

Поступила после рецензирования 20.05.26

Принята к публикации 04.06.26

V.E. RUSANOV¹, P.S. MILCHEVSKY¹, S.R. AIDAROV¹, P.S. MASLOV²

¹Research Center of the Tunnelling Association LLC, 2 Kolskaya St., Bldg. 6, 129329, Moscow, Russian Federation

²JSC «Severstal Management», 2 Klary Tsetkin St., 127299, Moscow, Russian Federation

FULL-SCALE TESTING OF STEEL FIBRE REINFORCED CONCRETE FLAT SLAB

Abstract

Introduction. The use of steel fibre reinforced concrete (SFRC) in flat slabs without capitals remains limited despite its potential to improve crack resistance and reduce reinforcement complexity. This study investigates a slab with combined reinforcement, integrating steel fibres with localized bar reinforcement.

Aim. To experimentally verify the structural performance and load-bearing capacity of a column-supported SFRC flat slab with combined reinforcement through full-scale testing.

Materials and Methods. Full-scale tests were carried out on a slab of a local wastewater treatment facility at the age of 30 days. The concrete class was B30, and Hendix® Prime 75/52 steel fibres were used at a dosage of 70 kg/m³. The load was applied stepwise at the slab centre over an area of 1.5 × 3.0 m. The maximum load reached 15.5 tonnes-force (3.45 tonnes-force/m²). A finite element model and elastic analysis at the ultimate limit state were used to ensure equivalence between test and design loading conditions.

Results. The slab exhibited elastic behaviour up to approximately 65 % of the maximum load. Further loading resulted in stiffness reduction and nonlinear deflection growth, reaching 2.10 mm at peak load. No visible cracking was observed. Residual deformation after unloading was 0.14 mm.

Conclusions. The results confirm the feasibility of using SFRC with combined reinforcement in flat slabs. The proposed solution ensures adequate load-bearing capacity and crack resistance while reducing conventional reinforcement, indicating strong potential for practical implementation.

Keywords: steel fibre reinforced concrete, steel fibre, flat slab, combined reinforcement, full-scale testing, deflection, crack width control, finite element analysis

For citation: Rusanov V.E., Milchevsky P.S., Aidarov S.R., Maslov P.S. Full-scale testing of steel fibre reinforced concrete flat slab. *Concrete and reinforced concrete*, 2026, no. 3 (634), pp. 100–111. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3\(634\)-100-111](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2026-3(634)-100-111) EDN: AZMFCX

Authors contributions

All authors contributed equally to the preparation of the publication.

Funding

The study received no external funding.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgements

The authors express their gratitude to PSO-733 LLC for providing the opportunity to implement the pilot structure and organize full-scale testing, as well as to Research Center of the Tunnelling Association LLC, Severstal-Metiz JSC, and Rusfibra-TS LLC for their professional contribution to the organization and technological support of the experimental preparation and execution of the works.

Received 06.05.26

Revised 20.05.26

Accepted 04.06.26

Введение

Современное строительство характеризуется устойчивыми тенденциями к повышению технологичности конструктивных решений, снижению трудоемкости строительно-монтажных работ, сокращению сроков возведения сооружений и одновременному обеспечению требуемого уровня надежности, долговечности и безопасности конструкций. Одним из направлений решения указанных задач является применение дисперсно-армированных бетонов, в том числе сталефибробетона (СФБ), позволяющего повысить трещиностойкость, ударостойкость, сопротивление локальным повреждениям и способность бетонной матрицы воспринимать растягивающие напряжения после образования трещин [1–10].

В мировой практике СФБ широко применяется в промышленных полах, дорожных и аэродромных покрытиях, тоннельных обделках, набрызг-бетонных креплениях, сборных и монолитных конструкциях различного назначения [11–16]. Вместе с тем, применение СФБ в ответственных плитных конструкциях зданий и сооружений пока носит ограниченный характер. Особенно это относится к бескапитальным безригельным перекрытиям, опираемым непосредственно на колонны.

Бескапитальные безригельные плиты обладают рядом очевидных архитектурных и технологических преимуществ: обеспечивают свободную планировку помещений, позволяют уменьшить строительную высоту перекрытий, упростить устройство инженерных коммуникаций и повысить эксплуатационную гибкость зданий. Однако такие конструкции предъявляют повышенные требования к расчетному обоснованию, армированию зон опирания на колонны, трещиностойкости, жесткости и сопротивлению продавливанию.

При традиционном железобетонном исполнении бескапитальные плиты, как правило, требуют развитого стержневого армирования, особенно в надколонных зонах и полосах, расположенных по осям колонн. Это приводит к высокой насыщенности арматурой, усложнению технологии армирования, повышенным требованиям к фиксации арматурных изделий в проектном положении и контролю защитных слоев, а также к увеличению трудоемкости работ.

Одним из рациональных направлений совершенствования таких конструкций является применение комбинированного армирования, при котором объемное дисперсное армирование стальной фиброй сочетается с локальным стержневым армированием в наиболее напряженных зонах. В этом случае стальная фибра не рассматривается как формальная полная замена всей стержневой арматуры, а используется как конструктивный элемент, повышающий трещиностойкость, остаточную прочность при растяжении, сопротивление локальным повреждениям и пространственную однородность работы материала.

Целью настоящей работы является экспериментально-расчетная оценка работы бескапитальной безригельной плиты перекрытия из СФБ с комбинированным армированием по результатам натурных статических испытаний полноразмерной конструкции.

Предпосылки применения СФБ в бескапитальной плитной конструкции

Решение о применении СФБ в бескапитальной безригельной плите было обусловлено необходимостью упрощения армирования при сохранении требуемого уровня надежности и трещиностойкости конструкции. Для заказчика практический интерес представляла возможность снижения трудоемкости арматурных работ, уменьшения плотности стержневой арматуры в теле плиты, повышения технологичности бетонирования и снижения риска возникновения дефектов, связанных с затрудненным размещением и фиксацией арматурных элементов, а также возможными ошибками при стержневом армировании.

В традиционных плитных конструкциях значительный объем работ приходится на изготовление, доставку, раскладку, вязку и фиксацию арматурных сеток и отдельных стержней [17–19]. В бескапитальных безригельных плитах эти операции дополнительно усложняются необходимостью усиления надколонных зон, устройства верхнего и нижнего армирования, соблюдения проектного положения арматуры и обеспечения защитных слоев. Повышенная плотность арматуры может затруднять укладку и уплотнение бетонной смеси, особенно в зонах пересечения арматурных элементов.

Применение СФБ позволяет перераспределить часть функций стержневой арматуры на объемное дисперсное армирование. Стальная фибра, распределенная в объеме бетонной матрицы, обеспечивает несущую способность материала после трещинообразования, а также позволяет надёжно контролировать раскрытие и развитие трещин. В результате появляется возможность перехода от традиционного варианта сплошного насыщенного стержневого армирования к более рациональной схеме комбинированного армирования.

При этом принципиально важным является не отказ от стержневой арматуры как таковой, а ее рациональное локальное применение в зонах, где она наиболее эффективна и необходима по условиям работы конструкции. В рассматриваемом случае конструктивное решение предусматривало объемное дисперсное армирование плиты стальной фиброй в сочетании с локальным стержневым армированием по осям колонн.

Таким образом, внедрение рассматриваемого конструктивного решения представляло собой управляемый инженерный процесс, включающий расчетное моделирование, отработку процесса приготовления сталефибробетонной смеси на бетонном заводе, подтверждение технологических и прочностных характеристик материала по контрольным образцам, изготовление опытной конструкции, проведение натурных испытаний и сопоставление расчетных и экспериментальных данных. Данная публикация представляет результаты по расчетному моделированию и натурным испытаниям.

Описание опытной конструкции и материала

Опытная конструкция СФБ плиты перекрытия была изготовлена в составе сооружения ЛОС. Испытываемая плита реализована в составе конструкции в виде

бескапитальной безригельной конструкции, опертой на колонны и стены. Геометрические параметры соору-

жения и расположение колонн принимались в соответствии с проектной схемой (рис. 1).

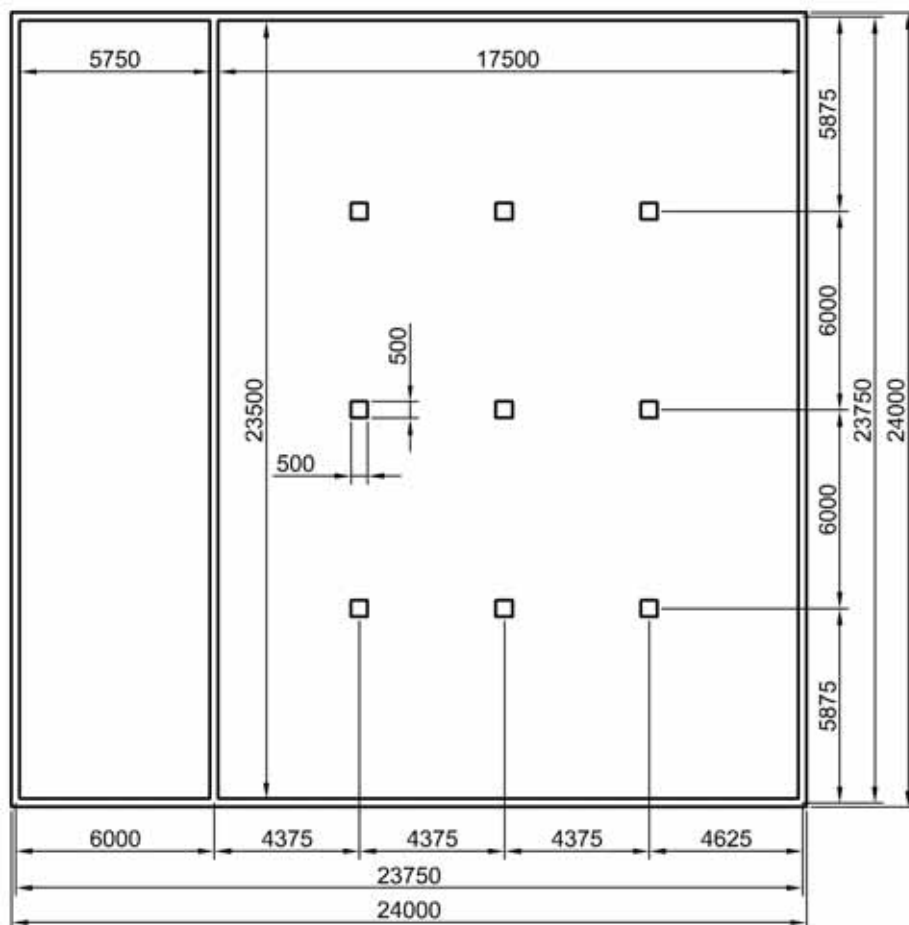


Рис. 1. Геометрические параметры конструкции ЛОС в плане
Fig. 1. Plan view of the geometric parameters of the wastewater treatment facility structure

Плита была забетонирована 10 марта 2026 г. (рис. 2). Натурные испытания были проведены 9 апреля 2026 г., то есть в возрасте 30 суток. Проектный класс бетона по прочности на сжатие составлял В30. Для

дисперсного армирования применялась стальная проволочная фибра Hendix® prime 75/52 с анкерами на концах. Расход стальной фибры составлял 70 кг/м³.



Рис. 2. Процесс бетонирования СФБ плиты (автор фото Маслов П.С.)
Fig. 2. Concreting process of the SFRC slab (photo by P.S. Maslov)

Перед проведением испытаний был выполнен контроль прочности бетона неразрушающими методами с использованием склерометра и ультразвукового измерителя прочности бетона (рис. 3). По результатам контрольных измерений был подтвержден класс прочности бетона не ниже проектного В30.



Рис. 3. Процесс контроля прочности бетона
(автор фото Маслов П.С.)

Fig. 3. Concrete strength testing process (photo by P.S. Maslov)

Конструктивное решение плиты предусматривало комбинированное армирование: объемное дисперсное армирование стальной фиброй и локальное стержневое армирование по осям колонн. Такая схема была принята с учетом особенностей работы бескапитальных плит, в которых характерные зоны концентрации усилий возникают в полосах, проходящих через колонны, а также в зонах опирания и возможного продавливания.

Особенностью проведенной работы являлось то, что испытанная плита в составе ЛОС использовалась как натурный фрагмент для проверки напряженно-деформированного состояния, эквивалентного расчетной работе проектируемой бескапитальной безригельной плиты перекрытия антресолей второго уровня административно-бытового корпуса в складских помещениях. Поэтому схема испытаний назначалась не только исходя из возможности приложения нагрузки на объекте, но и с учетом расчетного критерия эквивалентности напряженного состояния.

Методика натурных испытаний

Загрузке испытательной нагрузкой подвергалась ячейка плиты размерами 4375 × 6000 мм по осям колонн (рис. 1 и рис. 4). Нагрузка размещалась в центральной части пролета между колоннами на площадке размером 1,5 × 3,0 м. Площадь загрузки составляла 4,5 м².

Для нагружения использовались пакеты строительных материалов, железобетонные блоки свай, блоки фундаментов и поддон с коробками стальной фибры (рис. 5). Общая максимальная нагрузка была доведена до 15,5 тс. В пределах пятна загрузки это соответствует интенсивности:

$$q = 15,5 / 4,5 = 3,45 \text{ тс/м}^2.$$

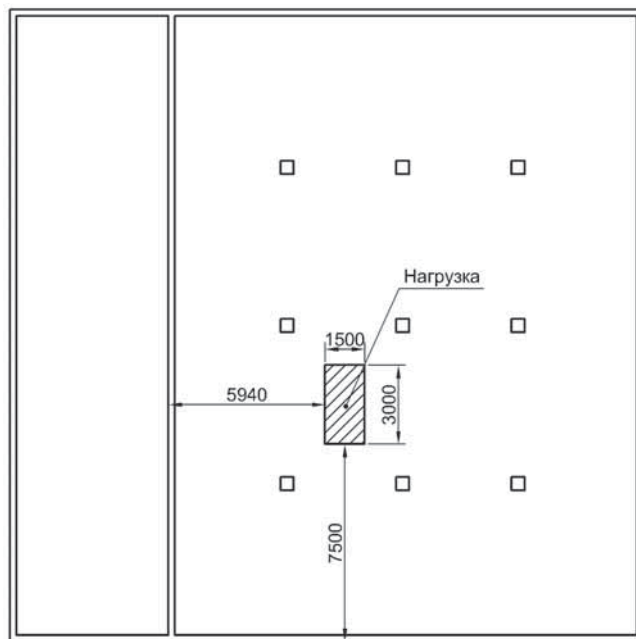


Рис. 4. Схема приложения нагрузки
Fig. 4. Load application scheme



Рис. 5. 15-я ступень загрузки с максимальной нагрузкой 15,5 тс (автор фото Маслов П.С.)

Fig. 5. 15th loading stage with a maximum load of 15.5 tf
(photo by P.S. Maslov)

Контроль массы грузов осуществлялся по встроенному в подъемный кран датчику веса. Испытания проводились в два этапа: нагружение и разгрузка.

Нагружение и разгрузка выполнялись ступенчато. На каждой ступени производилась фиксация прогиба

плиты в центре загруженной ячейки с использованием индикатора часового типа (рис. 6).



Рис. 6. Процесс монтажа и индикатор часового типа, установленный по центру СФБ плиты в загружаемой ячейке (автор фото Маслов П.С.)

Fig. 6. Installation process and dial gauge positioned at the centre of the SFRC slab within the loaded panel (photo by P.S. Maslov)

Такой способ проведения испытаний позволил получить диаграмму «нагрузка – прогиб» (рис. 7) для стадии нагружения и разгрузки, оценить максималь-

ную деформацию, остаточную деформацию после полной разгрузки, а также выполнить визуальный контроль возможного трещинообразования.

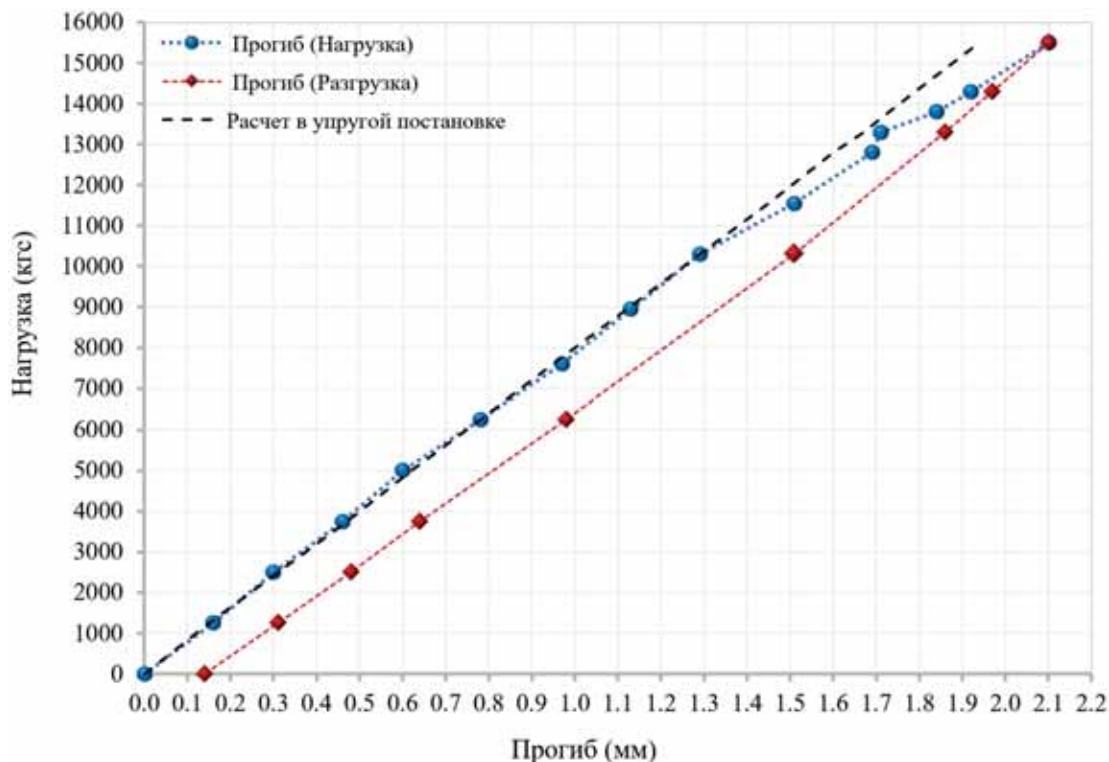


Рис. 7. Графики «нагрузка – прогиб»

Fig. 7. Load-deflection curves

Схема испытаний была назначена с учетом сопоставления с расчетной схемой работы проектируемой бескапитальной плиты. В качестве критерия

эквивалентности использовался уровень главных растягивающих напряжений в надколонных областях.

Результаты натурных испытаний

Результаты испытаний представлены в табличном виде (табл. 1) и графическом виде на рис. 7. Натурные испытания показали устойчивую работу плиты при ступенчатом увеличении нагрузки до максимального значения 15,5 тс. При достижении максимальной нагрузки измеренный прогиб в центре загруженной ячейки составил 2,10 мм.

Таблица 1

Результаты испытаний

Table 1

Test results

№ п/п	Нагрузка			Измерения	
	На ступень, кгс	Всего кгс	кН/м ²	Прогиб, мм	Время
ЗАГРУЗКА	1	0	0	0.00	-
	2	1250	1250	2.73	0.16
	3	1250	2500	5.45	0.30
	4	1250	3750	8.18	0.46
	5	1250	5000	10.90	0.60
	6	1250	6250	13.63	0.78
	7	1350	7600	16.57	0.97
	8	1350	8950	19.51	1.13
	9	1350	10300	22.45	1.29
	10	1250	11550	25.18	1.51
	11	1250	12800	27.90	1.69
	12	500	13300	28.99	1.71
	13	500	13800	30.08	1.84
	14	500	14300	31.17	1.92
	15	1200	15500	33.79	2.10
РАЗГРУЗКА	16	-1200	14300	31.17	1.97
	17	-1000	13300	28.99	1.86
	18	-3000	10300	22.45	1.51
	19	-4050	6250	13.63	0.98
	20	-2500	3750	8.18	0.64
	21	-1250	2500	5.45	0.48
	22	-1250	1250	2.73	0.31
	23	-1250	0	0.00	0.14

После полной разгрузки была зафиксирована остаточная деформация 0,14 мм. Отношение остаточной деформации к максимальному прогибу составило $\approx 6,7\%$ (i.e., $0,14 / 2,10$). Таким образом, остаточная деформация составила менее 7 % от максимального прогиба, что свидетельствует о преимущественно упругой работе конструкции при рассматриваемом уровне нагружения с проявлением ограниченной неупругой составляющей.

В ходе испытаний выполнялся визуальный контроль состояния плиты. Трещинообразования, связанного с действием испытательной нагрузки, выявлено не было. Это является принципиально важным

результатом, поскольку испытательная нагрузка создавала в конструкции напряженное состояние, сопоставимое с расчетным случаем работы плиты при эксплуатационном нагружении.

Характер диаграммы «нагрузка – прогиб» показал практически линейную работу конструкции на начальных ступенях нагружения. При приближении к максимальному уровню нагрузки экспериментальная кривая отклонялась от расчетной упругой линии, что может свидетельствовать о развитии неупругих деформаций в СФБ. При этом отсутствие видимых трещин и малая величина остаточной деформации после разгрузки подтверждают сохранение работоспособного состояния плиты.

Расчетная модель

Для интерпретации результатов испытаний и сопоставления с расчетными предпосылками была разработана конечно-элементная модель сооружения в программном комплексе ZSoil (Швейцария), реализующем метод конечных элементов (рис. 8).

В расчетной модели плита перекрытия, колонны и стены сооружения моделировались пространственными восьмиузловыми конечными элементами. Нижняя плита сооружения в явном виде не моделировалась. Условия жесткого объединения стен и колонн с нижней плитой задавались линейными связями по трем направлениям в соответствующих узлах расчетной модели.

Испытательная нагрузка моделировалась как равномерно распределенная нагрузка, приложенная в центре нагружаемой ячейки плиты на площадке $1,5 \times 3,0$ м. Такое представление соответствует фактической схеме приложения нагрузки при натурных испытаниях.

Дополнительно рассматривалась схема равномерного нагружения плиты по всей площади. Эта схема использовалась для оценки эквивалентности испытательной нагрузки расчетному воздействию. Первоначально была проанализирована схема с равномерно распределенной нагрузкой 480 кгс/м^2 , соответствующей проектной нагрузке 400 кгс/м^2 с учетом коэффициента надежности по нагрузке 1,2 ($1,2 \cdot 400 = 480 \text{ кгс/м}^2$). По результатам расчета в упругой постановке эта нагрузка формировала главные растягивающие напряжения в надколонной зоне порядка 3,6 МПа. Схема испытаний с нагрузкой 15,5 тс на площадке $1,5 \times 3,0$ м формировала в той же характерной зоне напряжения порядка 3,79 МПа (рис. 9).

Для получения более близкого расчетного эквивалента равномерная нагрузка была увеличена до расчетного значения 500 кгс/м^2 . При этом расчетные главные растягивающие напряжения составили порядка 3,76 МПа (рис. 9), что практически соответствует уровню напряжений от испытательной схемы. На основании этого нагрузка 15,5 тс на локальной площадке была принята как эквивалентная равномерно распределенной нагрузке 500 кгс/м^2 по критерию главных растягивающих напряжений в характерной надколонной зоне.

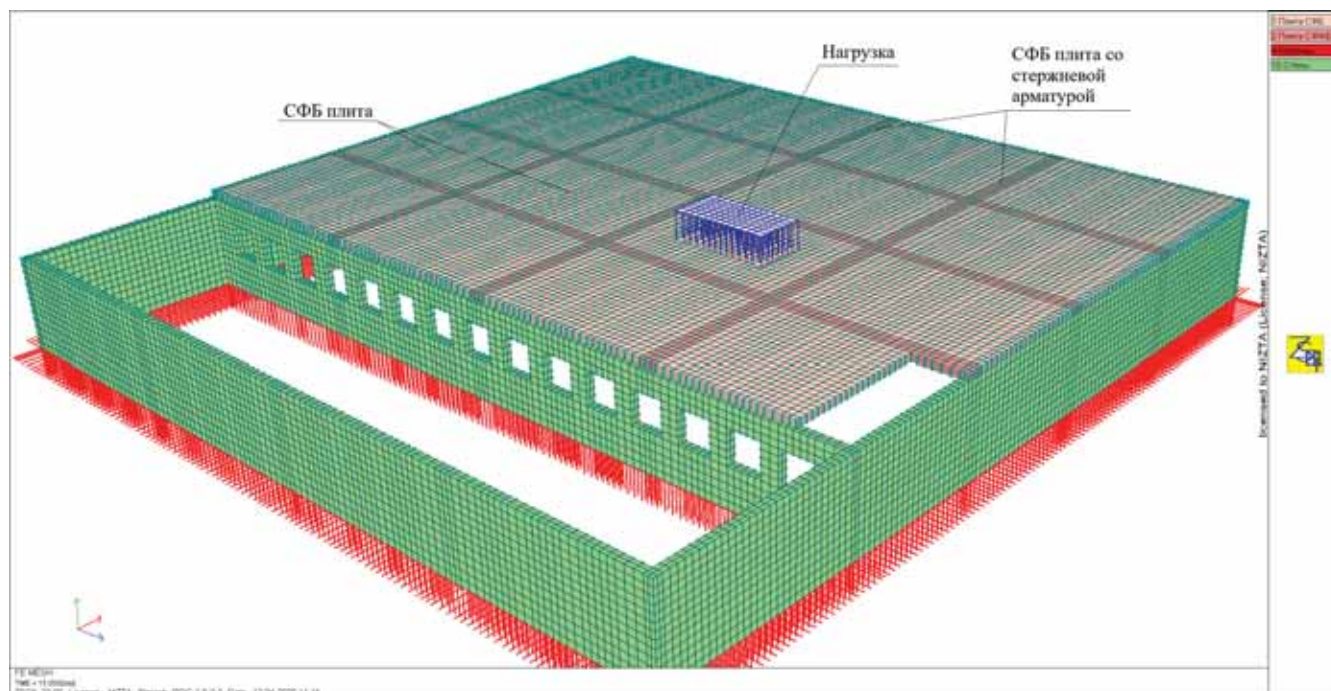


Рис. 8. Общий вид модели ЛОС, выполненной в программном комплексе ZSoil (МКЭ)
Fig. 8. General view of the wastewater treatment facility model developed in the ZSoil software (FEM)

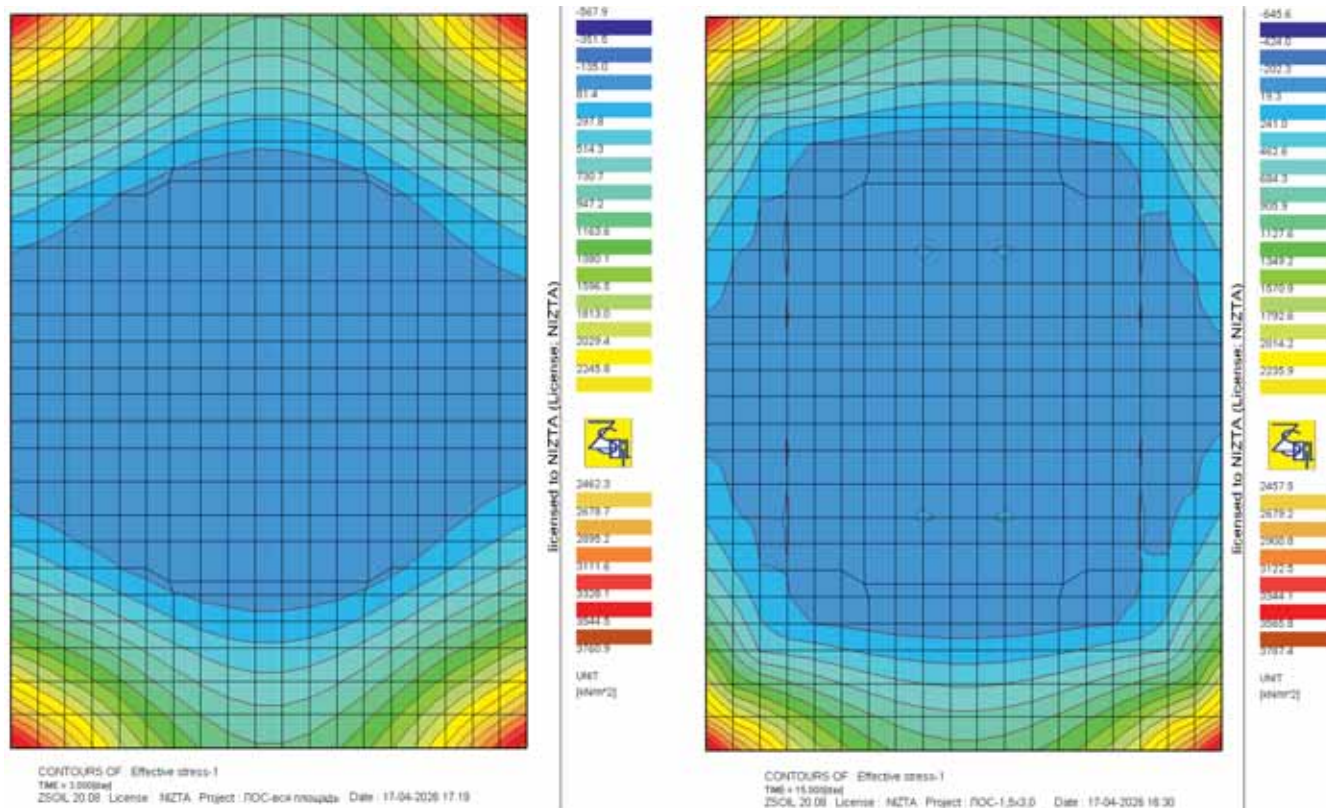


Рис. 9. Изополя главных растягивающих напряжений σ , кПа, в верхнем уровне плиты в зонах без стержневой арматуры: рисунок слева – для схемы нагружения 500 кгс/м² по всей площади плиты перекрытия ЛОС; рисунок справа: для схемы, соответствующей натурным испытаниям при нагрузке 15,5 тс
Fig. 9. Contours of principal tensile stresses σ , (kPa) at the top surface of the slab in zones without bar reinforcement: the left image corresponds to a uniformly distributed load of 500 kgf/m² over the entire slab area of the wastewater treatment facility; the right image corresponds to the loading scheme used in the full-scale test with a load of 15.5 tf

Таким образом, испытательная схема позволила создать в опытной плите напряженное состояние эквивалентное проектному при технически реализуемом способе нагружения натурной конструкции.

Сопоставление расчетных и экспериментальных результатов

Сопоставление результатов натурных испытаний с расчетом выполнялось по диаграмме «нагрузка – прогиб». В качестве расчетной линии использовалась упругая постановка с модулем упругости бетона 27,5 ГПа. Такой вариант расчетной жесткости хорошо согласуется с начальным участком экспериментальной диаграммы нагружения.

На начальных ступенях нагружения экспериментальные точки располагаются близко к расчетной упругой линии, что подтверждает адекватность расчетной оценки начальной жесткости плиты. При увеличении нагрузки до максимального уровня экспериментальная кривая постепенно отклоняется вправо от расчетной упругой линии. Такое отклонение закономерно для железобетонных и фибробетонных конструкций и может быть связано с развитием неупругих деформаций, перераспределением напряжений, начальным трещинообразованием в бетонной матрице без формирования видимых трещин, а также с особенностями работы конструктивной системы в натурных условиях.

По результатам расчета максимальный прогиб плиты при схеме нагружения, соответствующей испытаниям, составил около 1,94 мм (рис. 10). Фактически измеренный прогиб при максимальной нагрузке составил 2,10 мм.

Следует отметить, что указанное совпадение не означает полного исчерпания вопросов расчетного описания работы СФБ плит. Для дальнейшего развития методики проектирования подобных конструкций требуется накопление экспериментальных данных по плитам различных размеров, схем опирания, уровней армирования, типов и дозировок фибры, а также проведение испытаний до более высоких уровней нагружения, включая стадии образования, раскрытия трещин и разрушения. Однако в рамках рассматриваемой работы полученное соответствие расчетного и экспериментального прогибов подтверждает корректность принятой расчетной постановки для оценки жесткости конструкции при заданном уровне нагрузки.

Обсуждение результатов

Проведенные натурные испытания имеют важное практическое значение для развития отечественной практики применения СФБ в ответственных плитных конструкциях. Полученные результаты подтверждают, что бескапитальная безригельная плита из СФБ с комбинированным армированием способна воспринимать испытательную нагрузку, эквивалентную расчетной эксплуатационной по уровню главных растягивающих напряжений, без образования видимых трещин и при малых прогибах.

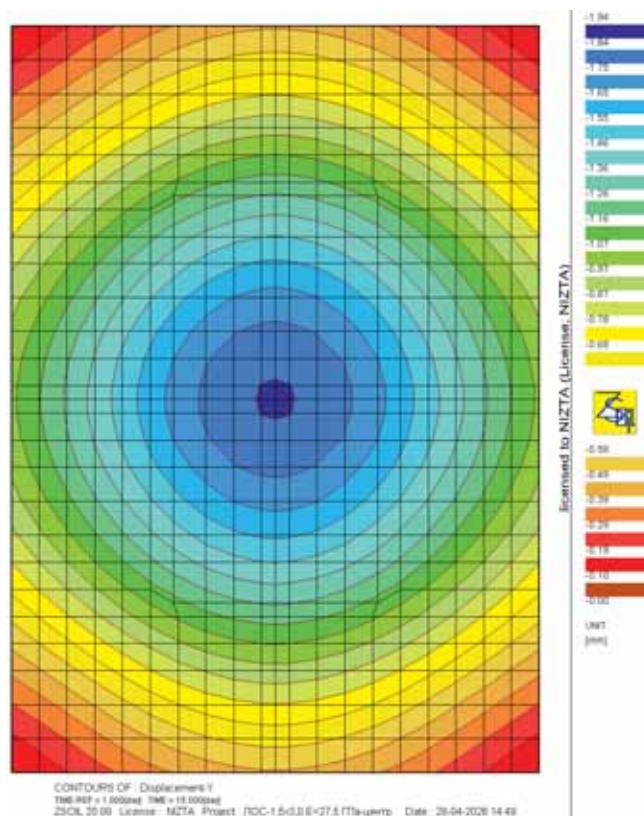


Рис. 10. Изополя вертикальных деформаций (прогиб) плиты по центру загруженной ячейки для схемы, соответствующей натурным испытаниям при нагрузке 15,5 тс (максимальный прогиб 1,94 мм)

Fig. 10. Contours of vertical deformations (deflection) of the slab at the centre of the loaded panel for the loading scheme corresponding to the full-scale test with a load of 15.5 tf (maximum deflection 1.94 mm)

Принципиально важным результатом является подтверждение возможности рационального сочетания объемного дисперсного армирования и локального стержневого армирования. В отличие от традиционного железобетона, где сопротивление растяжению после образования трещин в основном обеспечивается стержневой арматурой, СФБ обеспечивает распределенное сопротивление растягивающим напряжениям по объему материала. Таким образом, сочетание СФБ и стержневого армирования может представлять собой более эффективное конструктивное решение, при котором умеренные по уровню нагрузки и усилия в пределах плиты воспринимаются дисперсным армированием, тогда как участки с повышенными значениями напряжений дополнительно обеспечиваются традиционным стержневым армированием.

Для бескапитальных плит одним из наиболее ответственных расчетных случаев является работа в зонах опирания на колонны, где формируются повышенные растягивающие напряжения и усилия, связанные с продавливанием. Применение стальной фибры позволяет повысить трещиностойкость бетона в этих зонах, а локальное стержневое армирование по осям колонн обеспечивает дополнительную несущую способность и надежность в направлениях действия основных расчетных усилий [20–23].

С технологической точки зрения применение комбинированного армирования может позволить снизить объем и сложность стержневого армирования по сравнению с традиционными железобетонными решениями. Это создает предпосылки для сокращения трудоемкости армирования, упрощения контроля качества работ, повышения удобоукладываемости бетонной смеси в зонах, насыщенных стержневым армированием и снижения вероятности технологических дефектов.

При этом результаты проведенных испытаний не следует интерпретировать как универсальное основание для отказа от стержневой арматуры в бескапитальных плитах. Напротив, они показывают перспективность расчетно-обоснованного и экспериментально подтвержденного подхода к комбинированному армированию, при котором стальная фибра и стержневая арматура выполняют взаимодополняющие функции.

Для дальнейшего внедрения подобных решений необходима разработка расчетных подходов, учитывающих остаточную прочность СФБ на растяжение, работу материала после трещинообразования, продавливание, жесткость плит на разных стадиях нагружения, а также влияние технологических факторов на распределение фибры в объеме конструкции. Существенное значение имеет также создание экспериментальной базы по натурным и лабораторным испытаниям плитных элементов из СФБ с различными схемами армирования.

Выводы

1. Проведены натурные статические испытания бескапитальной безригельной плиты перекрытия из СФБ с комбинированным армированием. По имеющимся у авторов сведениям, рассматриваемая конструкция является первым в отечественной практике опытом устройства подобной плиты.

2. Конструктивное решение предусматривало объемное дисперсное армирование бетона стальной фиброй Hendix® prime 75/52 в количестве 70 кг/м³ и локальное стержневое армирование по осям колонн.

3. Опытная плита была изготовлена из бетона проектного класса В30. Перед испытаниями неразрушающими методами был подтвержден класс прочности бетона не ниже проектного.

4. Испытания проводились в возрасте 30 суток. Нагрузка прикладывалась в центральной части пролета между колоннами на площадке 1,5 × 3,0 м. Максимальная суммарная нагрузка составила 15,5 тс, что соответствует интенсивности 3,45 тс/м² в пределах пятна нагружения.

5. При максимальной испытательной нагрузке прогиб в центре загруженной ячейки составил 2,10 мм. После полной разгрузки остаточная деформация составила 0,14 мм (6,7 % от максимального прогиба).

6. Трещинообразования, связанного с действием испытательной нагрузки, в ходе визуального контроля испытания выявлено не было.

7. Испытательная схема была принята по критерию эквивалентности главных растягивающих напряжений в характерных надколонных зонах. Нагрузка 15,5 тс, приложенная на локальной площадке 1,5 × 3,0 м, фор-

мировала напряженное состояние, близкое к состоянию от равномерно распределенной нагрузки 500 кгс/м² по всей площади плиты.

8. Полученные результаты подтверждают перспективность применения СФБ с комбинированным армированием в бескапитальных безригельных плитах перекрытия при обязательном расчетном обосновании, контроле характеристик материала и экспериментальной проверке опытных конструктивных решений.

Список литературы

1. Pujadas P., Blanco A., de la Fuente A., Aguado A. Cracking behavior of FRC slabs with traditional reinforcement. *Materials and Structures*, 2012, vol. 45, pp. 707–725. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9791-0>.
2. Ключев А.В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2011. № 2. С. 60–63. EDN: NYATIP.
3. Groli G., Caldentey A.P. Improving cracking behaviour with recycled steel fibres targeting specific applications – analysis according to fib Model Code 2010. *Structural Concrete*, 2017, vol. 18, pp. 29–39. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201500170>.
4. Гонов М.Е. Механические свойства фибробетонов при динамическом сжатии // *Проблемы прочности и пластичности*. 2022. Т. 84. № 1. С. 130–148. DOI: <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-1-130-148>. EDN: CRBUYR.
5. Камалова К.Д. Исследование усиления фибробетоном узлов монолитных железобетонных рамно-стержневых систем многоэтажных зданий при аварийных воздействиях // *Научный электронный журнал «Меридиан»*. 2020. Т. 37. № 3. С. 465–467. EDN: WJLLDO. URL: <https://meridian-journal.ru/site/article5be0/>
6. Groli G., Pérez A., Marchetto F., Aríñez F. Serviceability performance of FRC columns under imposed displacements: An experimental study. *Engineering Structures*, 2015, vol. 101, pp. 450–464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.035>.
7. Vasanelli E., Micelli F., Aiello M.A., Plizzari G. Crack width prediction of FRC beams in short and long term bending condition. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0043-3>.
8. Teng T., Chu Y-A, Chang F-A, Shen B-C, Cheng D-S. Development and validation of numerical model of steel fiber reinforced concrete for high-velocity impact. *Computational Materials Science*, 2008, vol. 42, pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.013>.
9. Wu H., Lin X., Zhou A. A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2020, vol. 135, 106117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106117>.
10. Магдеев У.Х., Морозов В.И., Пухаренко Ю.В., Хегай А.О. Эффективное использование высокопрочной арматуры в дисперсно-армированных же-

- лезобетонных конструкциях без предварительного напряжения // *Academia. Архитектура и строительство*. 2016. № 2. С.106–112. EDN: WFFVFB.
11. Aidarov S, Mena F, de la Fuente A. Structural response of a fibre reinforced concrete pile-supported flat slab: full-scale test. *Engineering Structures*, 2021, vol. 239, 112292. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.ENGSTRUCT.2021.112292>.
 12. Ключев С.В., Ключев А.В., Сопин Д.М. Тяжелонагруженные полы на основе мелкозернистых фибробетонов // *Инженерно-строительный журнал*. 2013. Т. 38. № 3. С. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.38.1>. EDN: PZETQZ.
 13. de la Fuente A., Escariz R.C., De Figueiredo A.D., Molins C., Aguado A. A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 30, pp. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.015>.
 14. de la Fuente A., Pujadas P., Blanco A., Aguado A. Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, vol. 27, pp. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.001>.
 15. di Prisco M., Martinelli P., Parmentier B. On the reliability of the design approach for FRC structures according to fib Model Code 2010: the case of elevated slabs. *Structural Concrete*, 2016, vol. 17, pp. 588–602. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201500151>.
 16. Rusanov V., Aidarov S., Pujadas P., Ikumi T., de la Fuente A. Experimental and design-oriented research on fiber reinforced concrete segmental tunnel linings: A systematic review. *Structural Concrete*, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.70538>.
 17. Ивлев М.А., Недосеко И.В. Сталефибробетон в производстве малоформатных изгибаемых элементов // *Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура*. 2012. Т. 8. № 4. С. 86–91. DOI: <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2012.04.16>. EDN: RSDKXX.
 18. Aidarov S., Nadaždi A., Pugach E., Tošić N., de la Fuente A. Cost-oriented analysis of fibre reinforced concrete column-supported flat slabs construction. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 51, 104205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104205>.
 19. Martinelli P., Colombo M., de la Fuente A., Cavalaro S., Pujadas P., di Prisco M. Characterization tests for predicting the mechanical performance of SFRC floors: design considerations. *Materials and Structures*, 2021, vol. 54, no. 2, pp.1–16. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01598-2>.
 20. Facconi L., Plizzari G., Minelli F. Elevated slabs made of hybrid reinforced concrete: Proposal of a new design approach in flexure. *Structural Concrete*, 2019, vol. 20, pp. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201700278>.
 21. Monserrat-López A., Bairán J.M., de la Fuente A., Fernández Ruiz M. Resistance partial factor calibration for SFRC elements without shear reinforcement subjected to punching shear according to EN 1992–1-1:2023. *Engineering Structures*, 2025, vol. 343 (Part D), 121219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121219>.
 22. Nguyen-Minh L., Rovňák M., Tran-Quoc T., Nguyen-Kim K. Punching shear resistance of steel fiber reinforced concrete flat slabs. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 14, pp. 1830–1837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.230>.
 23. Tan K.H., Venkateshwaran A. Punching shear in steel fiber-reinforced concrete slabs with or without traditional reinforcement. *ACI Structural Journal*, 2019, vol. 116, pp.107–118. DOI: <https://doi.org/10.14359/51713291>.

References

1. Pujadas P., Blanco A., de la Fuente A., Aguado A. Cracking behavior of FRC slabs with traditional reinforcement. *Materials and Structures*, 2012, vol. 45, pp. 707–725. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9791-0>.
2. Klyuev A.V. Steel fibre reinforced concrete for precast-monolithic construction. *Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, 2011, no. 2, pp. 60–63. EDN: NYATIP.
3. Grolí G., Caldentey A.P. Improving cracking behaviour with recycled steel fibres targeting specific applications – analysis according to fib Model Code 2010. *Structural Concrete*, 2017, vol. 18, pp. 29–39. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201500170>.
4. Gonov M.E. Mechanical properties of fibre-reinforced concrete under dynamic compression. *Problems of Strength and Plasticity*, 2022, vol. 8, no. 1, pp. 130–148. DOI: <https://doi.org/10.32326/1814-9146-2022-84-1-130-148>. EDN: CRBUYR.
5. Kamalova K.D. Investigation of strengthening of joints of monolithic reinforced concrete frame systems of multi-storey buildings using fibre-reinforced concrete under accidental actions. *Scientific Electronic Journal "Meridian"*, 2020, vol. 37, no. 3, pp. 465–467. EDN: WJLLDO. URL: <https://meridian-journal.ru/site/article5be0/>.
6. Grolí G., Pérez A., Marchetto F., Ariñez F. Serviceability performance of FRC columns under imposed displacements: An experimental study. *Engineering Structures*, 2015, vol. 101, pp. 450–464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.07.035>.
7. Vasanelli E., Micelli F., Aiello M.A., Plizzari G. Crack width prediction of FRC beams in short- and long-term bending conditions. *Materials and Structures*, 2014, vol. 47, pp. 39–54. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0043-3>.
8. Teng T., Chu Y.-A., Chang F.-A., Shen B.-C., Cheng D.-S. Development and validation of a numerical model of steel fibre reinforced concrete for high-velocity impact. *Computational Materials Science*, 2008, vol. 42, pp. 90–99. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.06.013>.
9. Wu H., Lin X., Zhou A. A review of mechanical properties of fibre reinforced concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, 2020, vol. 135, 106117. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106117>.
10. Magdeev U.Kh., Morozov V.I., Pukharensko Yu.V., Khagai A.O. Efficient use of high-strength reinforcement in fibre-reinforced concrete structures without prestressing.

- Academia. Architecture and Construction*, 2016, no. 2, pp.106–112. EDN: WFFVFB.
11. Aidarov S., Mena F., de la Fuente A. Structural response of a fibre reinforced concrete pile-supported flat slab: full-scale test. *Engineering Structures*, 2021, vol. 239, 112292. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112292>.
 12. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Sopin D.M. Heavy-duty floors based on fine-grained fibre-reinforced concrete. *Magazine of Civil Engineering*, 2013, vol. 38, no. 3, pp. 7–14. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.38.1>. EDN: PZETQZ.
 13. de la Fuente A., Escariz R.C., De Figueiredo A.D., Molins C., Aguado A. A new design method for steel fibre reinforced concrete pipes. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 30, pp. 547–555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.015>.
 14. de la Fuente A., Pujadas P., Blanco A., Aguado A. Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2012, vol. 27, pp. 60–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2011.07.001>.
 15. di Prisco M., Martinelli P., Parmentier B. On the reliability of the design approach for FRC structures according to fib Model Code 2010: the case of elevated slabs. *Structural Concrete*, 2016, vol. 17, pp. 588–602. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201500151>.
 16. Rusanov V., Aidarov S., Pujadas P., Ikumi T., de la Fuente A. Experimental and design-oriented research on fibre reinforced concrete segmental tunnel linings: a systematic review. *Structural Concrete*, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.70538>.
 17. Ivlev M.A., Nedoseko I.V. Steel fibre reinforced concrete in the production of small-sized flexural elements. *Bulletin of SGASU. Urban Planning and Architecture*, 2012, vol. 8, no. 4, pp. 86–91. DOI: <https://doi.org/10.17673/vestnik.2012.04.16>. EDN: RSDKXX.
 18. Aidarov S., Nadaždi A., Pugach E., Tošić N., de la Fuente A. Cost-oriented analysis of fibre reinforced concrete column-supported flat slabs construction. *Journal of Building Engineering*, 2022, vol. 51, 104205. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104205>.
 19. Martinelli P., Colombo M., de la Fuente A., Cavalaro S., Pujadas P., di Prisco M. Characterization tests for predicting the mechanical performance of SFRC floors: design considerations. *Materials and Structures*, 2021, vol. 54, no. 2, pp. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01598-2>.
 20. Facconi L., Plizzari G., Minelli F. Elevated slabs made of hybrid reinforced concrete: proposal of a new design approach in flexure. *Structural Concrete*, 2019, vol. 20, p. 52–67. DOI: <https://doi.org/10.1002/suco.201700278>.
 21. Monserrat-López A., Bairán J.M., de la Fuente A., Fernández Ruiz M. Resistance partial factor calibration for SFRC elements without shear reinforcement subjected to punching shear according to EN 1992–1-1:2023. *Engineering Structures*, 2025, vol. 343 (Part D), 121219. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121219>.
 22. Nguyen-Minh L., Rovňák M., Tran-Quoc T., Nguyen-Kim K. Punching shear resistance of steel fibre reinforced concrete flat slabs. *Procedia Engineering*, 2011, vol. 14, pp. 1830–1837. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.230>.
 23. Tan K.H., Venkateshwaran A. Punching shear in steel fibre reinforced concrete slabs with or without traditional reinforcement. *ACI Structural Journal*, 2019, vol. 116, pp. 107–118. DOI: <https://doi.org/10.14359/51713291>.

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Евгеньевич Русанов, канд. техн. наук, доцент, генеральный директор, ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» г. Москва

Vladimir E. Rusanov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, General Director of the Research Center of the Tunnelling Association LLC, Moscow
WoS ResearcherID: A-5349-2016
Scopus AuthorID: 56810805000
ORCID: 0000-0002-8199-7214
SPIN-код: 9041-1350
РИНЦ AuthorID: 649211
VLRUSANOV@MAIL.RU

Павел Сергеевич Мильчевский, заместитель генерального директора, ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» г. Москва

MILCHEVSKY.PS@NIZTA.RU
Pavel S. Milchevsky, Deputy General Director of the Research Center of the Tunnelling Association LLC, Moscow
WoS ResearcherID: PMW-7404-2026
Scopus AuthorID: 58567102800
ORCID: 0000-0003-1627-2142
SPIN-код: 7301-8285
РИНЦ AuthorID: 1145970

Станислав Русланович Айдаров, канд. техн. наук, доцент, научный консультант, ООО «НИЦ Тоннельной ассоциации» г. Москва

STANISLAV.AIDAROV@GMAIL.COM
Stanislav R. Aidarov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Scientific Consultant, Research Center of the Tunnelling Association LLC, Moscow
WoS ResearcherID: KFR-4832-2024
Scopus AuthorID: 57223425064
ORCID: 0000-0001-5576-7215
SPIN-код: 4858-9160
РИНЦ AuthorID: 1236296

Павел Сергеевич Маслов, менеджер, эксперт технологии сталефибробетона, АО «Северсталь Менеджмент», г. Москва ps.masloff@yandex.ru

Pavel S. Maslov, manager, expert for steel fibre reinforcement technology, JSC “SEVERSTAL MANAGEMENT” Moscow
ORCID: 0009-0005-0241-8712
SPIN-код: 6802-5348