

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА И РАСЧЕТ СООРУЖЕНИЙ

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH PAPER

УДК 69.04

DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.7

Влияние параметров дисперсного армирования на ползучесть высокопрочного сталефибробетона

Дмитрий Егорович Капустин

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(НИУ МГСУ); г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. В настоящее время при возведении сооружений атомных электростанций (далее АЭС) применяют несъемную опалубку из высокопрочного сталефибробетона (далее СФБ). За счет улучшенных физико-механических характеристик и высокой адгезии к монолитному бетону опалубка из СФБ является несущим элементом. В результате получают конструкцию с комбинированным армированием в виде стержневой арматуры и слоев из высокопрочного СФБ. При расчете подобных конструкций необходимо знать расчетные характеристики применяемых материалов для определения действительного напряженно-деформированного состояния. Высокопрочный СФБ является малоизученным материалом, и исследование его свойств, особенно при длительном действии нагрузок, является актуальной задачей.

Материалы и методы. Выполнены экспериментальные исследования влияния параметров дисперсного армирования (вид стальной фибры и ее количество по объему) на величину ползучести СФБ, изготовленного на высокопрочной цементно-песчаной матрице. Исследования выполнены на одном составе матрицы для трех видов стальной фибры, подходящих для изготовления листов опалубки толщиной 30 мм, наиболее часто встречающейся на рынке РФ. Рассмотрено объемное содержание фибры до 6 %. Уровень нагрузки составляет 0,3 от разрушающей (призменная прочность).

Результаты. Получены фактические величины параметров ползучести СФБ, необходимые для выполнения расчетов конструкций с комбинированным армированием.

Выводы. Установлено, что введение стальной фибры до 6 % обеспечивает снижение предельной меры ползучести до 20 % по сравнению с мелкозернистой матрицей. Однако при объемном содержании фибры до 1,5 % в результате разуплотнения матрицы может происходить и повышение меры ползучести до 10 %. С учетом большого числа факторов, влияющих на свойства СФБ, расчетные характеристики следует определять экспериментально.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: высокопрочный сталефибробетон, ползучесть, дисперсное армирование, мелкозернистая матрица, экспериментальное исследование, длительные испытания

Благодарности. Автор статьи выражает огромную благодарность инженеру НИУ МГСУ Безгодову Игорю Михайловичу, благодаря которому удалось выполнить комплексные исследования реологических характеристик высокопрочного сталефибробетона.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Капустин Д.Е. Влияние параметров дисперсного армирования на ползучесть высокопрочного сталефибробетона // Строительство: наука и образование. 2023. Т. 13. Вып. 1. Ст. 7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.7

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Егорович Капустин, kde90@bk.ru.

Influence of dispersed reinforcement parameters on the high-strength steel fiber concrete creep performance

Dmitriy E. Kapustin

Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU);
Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. At the present time, in the construction of nuclear power plants (NPP), non-removable formwork made of high-strength steel fibre concrete (SFRC) is used. Due to improved physical and mechanical properties and high adhesion to monolithic concrete, the SFRC formwork is a load-bearing element. The result is a structure with combined reinforcement in the form of bar reinforcement and high-strength SFRC layers. The calculation of the actual stress-strain state of such structures requires knowing the design characteristics of used materials. High-strength SFRC is understudied material, and research of its properties, especially under long-term loads, is a crucial task.

Materials and methods. Experimental studies of the effect of dispersion reinforcement parameters (type of steel fibre and its volume) on the creep value of SFRC made on a high-strength cement-sand matrix have been carried out. The research was carried out on the same matrix composition for three types of steel fibres suitable for the manufacture of

30 mm formwork sheets with a thickness of 30 mm, and most commonly found in the Russian market. A volumetric fibre content of up to 6 % was considered in the study. The load level is 0.3 of the breaking strength (prism strength).

Results. The actual values of the SFRC creep parameters required to carry out the calculations of structures with combined reinforcement.

Conclusions. It is found that the introduction of steel fiber up to 6 % provides a reduction of ultimate creep measure up to 20 % as compared to a fine-grained matrix. However, with up to 1.5 % volumetric content of fibre, an increase of up to 10 % in creep may also occur as a result of matrix decompaction. In the view of the large number of factors affecting the properties of SFRC, the calculated characteristics should be determined experimentally.

KEYWORDS: high-strength steel fibre concrete, creep, dispersed reinforcement, fine-grained matrix, experimental study, long-term tests

Acknowledgements. The author of the article is very grateful to Igor M. Bezgodov, an engineer of Moscow State University of Civil Engineering, who made it possible to carry out comprehensive studies of the rheological characteristics of high-strength steel fibre concrete.

FOR CITATION. Kapustin D.E. Influence of dispersed reinforcement parameters on the high-strength steel fiber concrete creep performance. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* [Construction: Science and Education]. 2023; 13(1):7. URL: <http://nso-journal.ru>. DOI: 10.22227/2305-5502.2023.1.7

Corresponding author: Dmitriy E. Kapustin, kde90@bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Для сооружений АЭС, нормативный срок службы которых составляет 100 лет, вопросы, связанные с ползучестью и длительной прочностью материалов, используемых при возведении основных сооружений, являются крайне важными. При внедрении сборно-монолитной технологии строительства с использованием пространственных армоопалубочных блоков с несъемной СФБ опалубкой [1, 2] появилась необходимость получения ее расчетных характеристик, в том числе показателей ползучести. Согласно требованиям проекта, опалубку изготавливают из высокопрочного СФБ (прочность на сжатие не менее 100 МПа) на мелкозернистой самоуплотняющейся матрице. После укладки в армоблоки монолитного бетона за счет высокой величины адгезии [3] получают конструкцию с комбинированным армированием, где помимо арматурных стержней присутствует листовое армирование из СФБ (рис. 1). Соответственно, для получения реальной картины перераспределения усилий в несущих элементах с учетом реологии используемых материалов [4–6] требуется знать фактические характеристики ползучести СФБ, т.е. пластических деформаций, возникающих в материале во времени при постоянном уровне нагружения.

В России расчет конструкций из СФБ регламентируется СП 360.1325800.2017¹, в котором при назначении коэффициента ползучести параметры дисперсного армирования (вид фибры и ее объемное содержание) не принимаются во внимание. Согласно этому документу, коэффициент ползучести принимают как для матрицы, используемой для изготовления СФБ. Представленный подход является допустимым [7, 8]. Но в матрицу из самоуплотняющегося мелкозернистого бетона, используемого для изготовления высокопрочного сталефибробетона несъемной опалубки с целью снижения водоцементного отношения и оптимизации ее структуры, вводят



Рис. 1. Фрагмент помещения из армоблоков с несъемной СФБ опалубкой

различные наномодификаторы и минеральные добавки. В результате получают СФБ с компактной структурой, армированный дисперсно распределенными по всему объему стальными волокнами. Механизм деформирования и разрушения подобного материала значительно отличается от имеющего место для обычного тяжелого бетона, что снижает достоверность реологических характеристик, полученных аналитически [9], и требует проведения дополнительных экспериментальных исследований [10].

Анализ литературы [11–20] показывает, что введение стальной фибры влияет на реологические характеристики сталефибробетона. Отмечено, что помимо параметров дисперсного армирования на величину ползучести оказывают влияние и другие условия, а именно возраст СФБ на момент приложения нагрузки, ее уровень (интенсивность), продолжительность действия и условия окружающей среды (температура и влажность), вид и содержание компонентов СФБ (тип заполнителя, свойства цемента, содержание цементного теста и водоцементное отношение).

¹ СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования.

В работе [13] отмечается, что введение фибры не изменяет характера изменения деформаций ползучести, однако сказывается на их значении. В исследованиях [14, 18, 19] деформации ползучести СФБ в любом возрасте были меньше, чем у матрицы. Так, коэффициент ползучести особо высокопрочных СФБ с содержанием фибры 3 % (по объему) был на 15–24 % меньше, чем у обычного тяжелого бетона, и составлял 0,8–1,0 [19]. Согласно исследованиям [18], введение фибры снижало деформации ползучести до 30 %.

В [20] отмечается, что введение стальной фибры в объеме 0,8 % незначительно сказывается на уменьшении деформаций ползучести (не более 12 %), но в этих исследованиях содержание фибры (по объему) не превышало 0,8 %. В [21] получено, что введение фибры может даже повысить деформации ползучести, что, по-видимому, связано с разрушением структуры матрицы волокнами фибры в процессе перемешивания и укладки [3].

Результаты анализа исследований по оценке влияния фибрового армирования на ползучесть СФБ показали, что коэффициент ползучести СФБ, как правило, меньше, чем у бетона матрицы. Однако системных исследований недостаточно и, соответственно, рекомендаций по нормированию этих характеристик в зависимости от вида и содержания фибры нет. К тому же большая часть исследований проведена на фибре больших диаметров (0,6 мм и выше), которая не применима для тонкостенных конструкций, к которым относится несъемная СФБ опалубка. На основании этого было принято решение о необходимости проведения комплексного исследования реологических характеристик СФБ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Все исследуемые составы СФБ были изготовлены на основе одной и той же самоуплотняющейся матрицы из мелкозернистого бетона.

Используемый состав матрицы (табл.) позволил получить мелкозернистый бетон прочностью 110 МПа (по результатам испытания образцов кубов с ребром 70 мм).

При проведении исследований применили виды фибры с оптимальными геометрическими параметрами для изготовления панелей несъемной опалубкой (латунированные диаметром 0,3 мм и длиной 15 и 30 мм). Эти виды фибры показали свою эффективность и технологичность при изготовлении опалубки [2, 3]. Также для сравнения приняли широко используемую в РФ и за рубежом фибру диаметром 0,7 мм и длиной 30 мм. Фибра длиной 15 мм имела волновой профиль, а длиной 30 мм была гладкой с анкерами по концам. Общий вид используемых стальных волокон представлен на рис. 2.

В исследованиях СФБ с волновой фиброй (ФСПВ 0,3 × 15) ее содержание (по объему) было принято равным 0,5, 1,0, 1,5, 3,0 и 6,0 %. Содержание фибры с анкерами (ФСПА 0,3 × 30 и ФСПА 0,7 × 30) в связи с технологическими ограничениями не превышало 1,5 % (при большем содержании волокон ФСПА 0,3 × 30 при перемешивании образовывались комки из фибры).

С учетом анализа литературных данных [11, 14, 16] испытания на ползучесть для СФБ проводили по аналогии с ГОСТ 24544–2020², несмотря на то, что он распространяется только на бетоны. После распалубки образцы хранили в камере нормального твердения в течение 28 сут. Затем 28 сут образцы хранились в условиях лаборатории для стабилизации влажности. Возраст образцов к началу испытания на ползучесть составлял около 56 сут. Непосредственно перед приложением длительной нагрузки проводили кратковременные испытания, при которых определяли кубиковую и призмную прочность СФБ.

Состав матрицы для изготовления СФБ, кг/м³

Цемент ЦЕМ I класса 52,5	Песок	Вода	Микрокремнезем	Известняковая мука	Пластификатор Полипласт ПК
666	1005	208	67	344	13,32



ФСПВ 0,3 × 15



ФСПА 0,3 × 30



ФСПА 0,7 × 30

Рис. 2. Виды стальной фибры

² ГОСТ 24544–2020. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести.

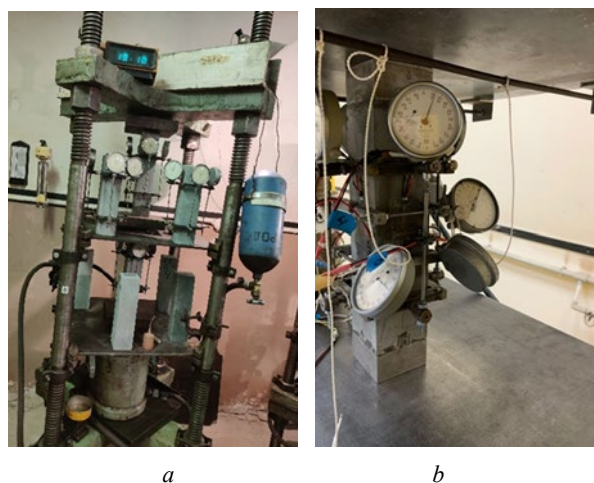


Рис. 3. Проведение испытаний: *a* — установка для проведения испытаний; *b* — образец при проведении испытаний на сжатие

При испытании образцов-призм измеряли также продольные и поперечные деформации.

Для испытания на ползучесть использовали пневмогидравлические установки. Каждая установка состояла из стальной рамы с гидравлическим домкратом (рис. 3, *a*). Постоянство давления в домкрате обеспечивал воздушно-масляный баллон (аккумулятор), предварительно закаченный до проектного давления, что позволяло компенсировать падение давления при деформировании образцов. Значения продольных и поперечных деформаций на поверхности бетона определяли с использованием индикаторов часового типа (цена деления 0,001 мм), установленных на базе 140 мм (рис. 3, *b*).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для определения уровня нагружения для испытания на ползучесть предварительно были проведены статические испытания на сжатие образцов призм. Результаты испытаний представлены на рис. 4.

Введение стальной фибры практически не влияло на призмную прочность СФБ (различие не превышало 8 %). При этом характер изменения был одинаковым для СФБ с анкерной

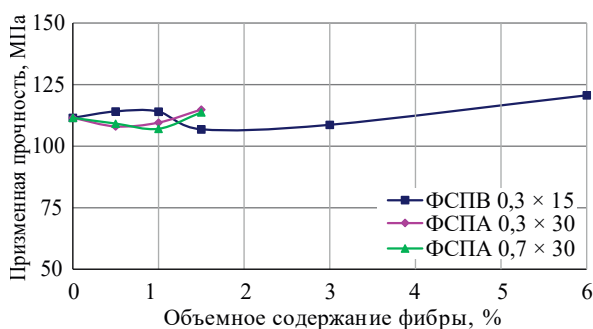


Рис. 4. Зависимость призмной прочности СФБ от объемного содержания фибры

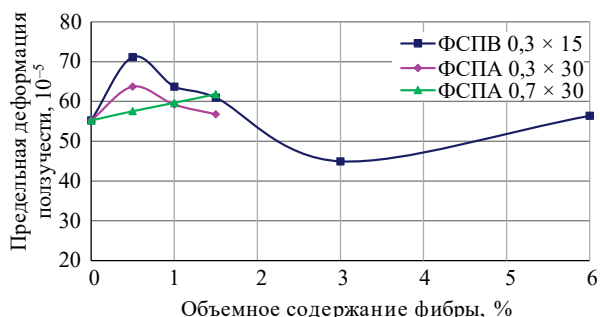


Рис. 5. Зависимость предельной деформации ползучести СФБ от объемного содержания фибры

фиброй толщиной 0,3 и 0,7 мм и длиной 30 мм (ФСПА 0,3 × 30 и ФСПА 0,7 × 30).

Характер разрушения образцов-призм из СФБ разных серий мало отличался друг от друга. Разрушение, как правило, было связано с образованием вертикальной магистральной трещины. При этом разрушение матрицы происходило взрывообразно, а при испытании СФБ образцы сохраняли свою форму. Значения модуля упругости мало зависели от содержания фибры и изменялись в диапазоне от 38 000 до 43 000 МПа, коэффициент Пуассона составлял 0,20–0,23.

Напряжение в образцах при проведении испытания на ползучесть составляло 30 % от призмной прочности СФБ, установленной при испытаниях кратковременной нагрузкой. В процессе испытания в заданное время определяли значения абсолютных деформаций для каждого загруженного и незагруженного образца.

Измерения деформаций производили в течение 180 сут. При обработке результатов измерения определяли средние значения деформаций для каждого образца и по ним строили линию регрессии в соответствии с методикой ГОСТ 24544–2020. Затем по линии регрессии определяли предельные деформации ползучести, т.е. деформации, соответствующие бесконечно длительному времени нагружения.

Диаграмма влияния параметров дисперсного армирования на предельную деформацию ползучести (рис. 5) показывает, что введение стальной фибры до 1,5 % не позволяет получить четкий тренд. Очевидно, это связано с разуплотнением структуры материала, являющимся следствием дополнительного воздухововлечения, как это было отмечено по результатам испытания на кратковременную нагрузку и при определении плотности. Особенно это проявляется для тонких волокон (диаметр 0,3 мм) при введении волновой фибры (ФСПВ 0,3 × 15), происходит увеличение деформаций ползучести более чем на 10 %. При содержании фибры более 1,5 % происходит уменьшение деформаций ползучести на 10–20 %, по сравнению с матрицей.

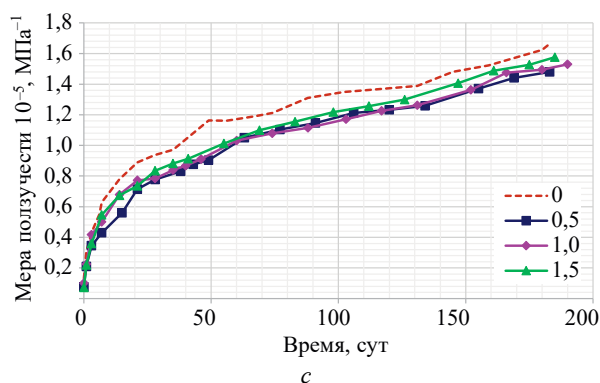
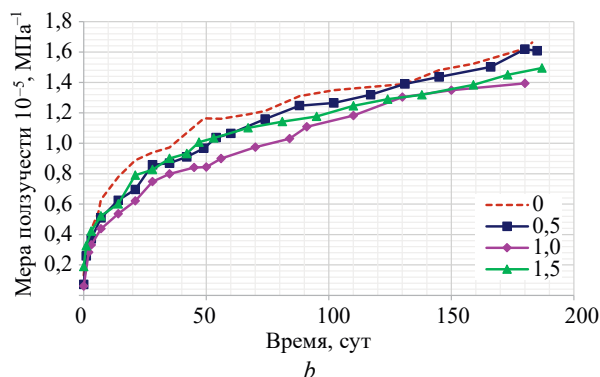
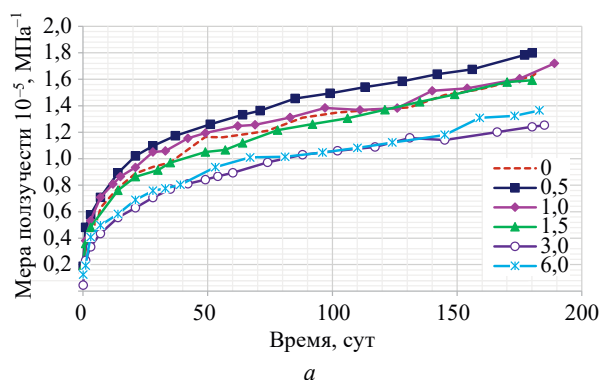


Рис. 6. Зависимость меры ползучести СФБ от объемного содержания фибры: а — ФСПВ 0,3 × 15; б — ФСПА 0,3 × 30; в — ФСПА 0,7 × 30

Диаграммы изменения меры ползучести во времени представлены на рис. 6. Мера ползучести характеризует деформацию ползучести на единицу напряжения (размерность МПа^{-1}) и является наиболее показательной характеристикой. Призмная прочность у исследуемых составов СФБ различается, соответственно, различны и значения напряжений, при которых измеряли деформации.

Расчеты предельной меры ползучести (рис. 7) показали, что введение фибры снижает параметры ползучести, что связано со сдерживанием деформаций в бетонной матрице стальными волокнами. При этом четкий тренд снижения коэффициента ползучести прослеживался при объемном содержании волокон более 1,5 % (снижение до 20 %). При меньшем содержании волокон мера ползучести не изменяется (для фибры ФСПА 0,7 × 30), либо увеличивается на 10–15 % (для фибры ФСПА 0,3 × 30 и ФСПВ 0,3 × 15).

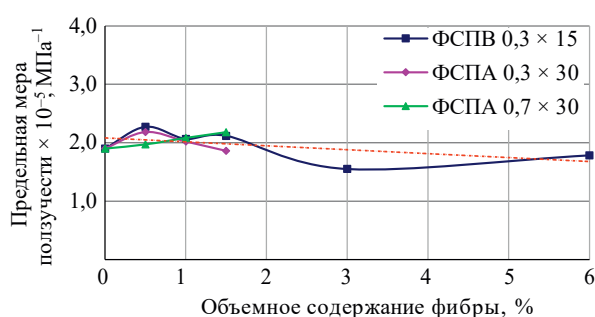


Рис. 7. Зависимость меры ползучести СФБ от объемного содержания фибры

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований при уровне нагрузки 0,3 от разрушающей и нормальных условиях окружающей среды установлено, что предельная мера ползучести для СФБ находится в диапазоне 1,5–2,3 МПа^{-1} .

Введение фибры волнового профиля (ФСПВ 0,3 × 15) и с анкерами (ФСПА 0,3 × 30) до 1,5 % по объему не позволяет получить четкий тренд изменения меры ползучести. Для фибры ФСПА 0,7 × 30 с увеличением ее объемного содержания выявлено увеличение меры ползучести на 10 %. Введение фибры от 1,5 до 6 % по объему обеспечивает снижение предельной меры ползучести сталефибробетона до 20 %.

Введение стальной фибры способствует дополнительному воздухововлечению при приготовлении смеси (отмечено по результатам измерения физико-механических характеристик СФБ). В явном виде при испытании на ползучесть данная особенность проявляется при малых процентах армирования (до 1,5 %), когда количества фибры недостаточно для компенсации результатов разуплотнения мелкозернистой матрицы. В этом случае наблюдается снижение физико-механических характеристик СФБ (рис. 4) и повышение предельных деформаций ползучести (рис. 5). Полученные значения коррелируются с результатами обзора литературных данных, где отмечены противоречия во влиянии введения стальных волокон на показатели ползучести СФБ.

Полученные результаты показывают, что помимо параметров дисперсного армирования на характеристики ползучести СФБ оказывают влияние и другие факторы. В проведенных исследованиях отмечено влияние технологических особенностей при приготовлении смеси — дополнительное вовлечение воздуха при перемешивании при объемном содержании фибры до 1,5 %. Вовлечение дополнительного воздуха при малом содержании фибры подтверждено определением ползучести. Соответственно, при определении действительных расчетных характеристик СФБ следует проводить прямые испытания, учитывающие не только состав, но и технологию изготовления.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов // Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции : монография. М. : Изд-во АСВ, 2011. 642 с.
2. Дорф В.А., Красновский Р.О., Капустин Д.Е. На пути к реализации технологии возведения зданий и сооружений АЭС из армоблоков с несъемной сталефибробетонной опалубки // Строительство в атомной отрасли. 2020. № 1. С. 47–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21641326>
3. Капустин Д.Е. Прочностные и деформационные характеристики несъемной сталефибробетонной опалубки как несущего элемента железобетонных конструкций : дис. ... канд. техн. наук. М., 2015. 211 с.
4. Тамразян А.Г. Жесткость изгибаемых железобетонных элементов с учетом нелинейной ползучести высокопрочного бетона на основе вязко-упругой модели наследственного старения // Вестник МГСУ. 2011. № 2 (1). С. 121–126. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17586454>
5. Домарова Е.В. Влияние ползучести на напряженно-деформированное состояние железобетонных многоэтажных зданий // Строительство и реконструкция. 2022. № 3 (101). С. 14–22. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/475>
6. Bourne-Webb P.J. The role of concrete creep under sustained loading, during thermo-mechanical testing of energy piles // Computers and Geotechnics. 2020. Vol. 118. P. 103309. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103309
7. Torres P.P., Ghorbel E., Wardeh G. Towards a new analytical creep model for cement-based concrete using design standards approach // Buildings. 2021. Vol. 11. P. 155. DOI: 10.3390/buildings11040155
8. Yuqi Zhou, Weiyi Chen, Peiyu Yan. Measurement and modeling of creep property of high-strength concrete considering stress relaxation effect // Journal of Building Engineering. 2022. Vol. 56. Issue 9. P. 104726. DOI: 10.1016/j.job.2022.104726
9. Wang Hui, Wang Yue. Review on self-compacting concrete creep // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 634. P. 012112. DOI: 10.1088/1755-1315/634/1/012112
10. Моисеенко Г.А. Изменение призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного сталефибробетона и его матрицы в зависимости от возраста // Строительные материалы. 2020. № 6. С. 13–17. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17
11. Безгоднов И.М. Исследования физико-механических характеристик высокопрочных бетонов // Технологии бетонов. 2022. № 4 (183). С. 31–36.
12. Vijaya kumar Setti, Dean kumar B., Swami B.L.P. Creep strain behaviour of triple-blended steel fiber self-compacting concrete // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 982. Issue 1. P. 012010. DOI: 10.1088/1755-1315/982/1/012010
13. Muller H.S. Constitutive models for creep of concrete — from the past to the future // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 55–69. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.55-69
14. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонных из самоуплотняющихся смесей // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли российской федерации в 2017 году : сб. науч. тр. Российской академии архитектуры и строительных наук. Т. 2. М., 2018. С. 237–246. DOI: 10.22337/9785432302663-237-246
15. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30.
16. Смирнов Д.А., Харлаб В.Д. Линейная ползучесть зрелого фибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2010. № 4 (25). С. 56–60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15633247>
17. Смирнов Д.А. Расчет сталефибробетонных статически неопределимых конструкций с учетом ползучести // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3 (28). С. 51–54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17333079>
18. Mangat P.S., Azari M.M. A theory for the creep of steel fibre reinforced cement matrices under compression // Journal of Material Science. 1985. Vol. 20. Pp. 1119–1133. DOI: 10.1007/BF00585757
19. Elzaigh W.A. Steel concrete reinforced concrete ground slab // University of Pretoria. 2001. Vol. 2. Pp. 2-1–2-25.
20. Nakov D. Experimental and analytical analysis of creep of steel fibre reinforced concrete // Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2018. Vol. 62. Issue 1. Pp. 226–231. DOI: 10.3311/PPci.11184
21. Balaguru P., Ramakrishnan V. Properties of fiber reinforced concrete: workability, behaviour under long-term loading and air-void characteristics // ACI Materials Journal. 1988. Vol. 85. Issue 3. Pp. 189–196. URL: <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcreteAbstractsPortal.aspx?m=details&i=1849>

Поступила в редакцию 11 января 2023 г.

Принята в доработанном виде 10 февраля 2023 г.

Одобрена для публикации 10 февраля 2023 г.

ОБ АВТОРЕ: **Дмитрий Егорович Капустин** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры испытания сооружений; **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**; 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; SPIN-код: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 57204881560; kde90@bk.ru.

INTRODUCTION

For NPP structures, the normative lifetime of 100 years, the issues related to creep and long-term strength of materials used in the construction of the main structures are of utmost importance. With the adaptation of prefabricated monolithic construction technology using spatial reinforced formwork units with non-removable SFRC formwork [1, 2], it became necessary to obtain its mechanical characteristics, including creep indicators. According to the project requirements — the formwork is made of high-strength SFB (compressive strength of not less than 100 MPa) on a fine-grained self-sealing matrix. After embedding the monolithic concrete in the reinforcement blocks, due to high adhesion value [3], a structure with combined reinforcement is obtained, where, in addition to reinforcement bars, there is SFRC sheet reinforcement (Fig. 1). Accordingly, to obtain a real picture of the redistribution of forces in the load-bearing elements, taking into account the rheology of the materials used [4–6], it is necessary to know the actual creep characteristics of SFRC, i.e. plastic deformations occurring in the material over time at a constant level of loading.

In Russia, the calculation of SFRC structures is regulated by SP 360.1325800.2017¹, in which the parameters of dispersed reinforcement (type of fibre and its volume) are not taken into account when determining the creep factor. According to this document, the creep coefficient is taken as for the matrix used for the production of SFRC. The presented approach is acceptable [7, 8]. But various nano-modifiers and mineral additives are introduced into the matrix of self-compacting fine-grained concrete used for making high-strength steel-fibre concrete of permanent formwork, in order to reduce the water-cement ratio and optimize its structure. The result is SFRC with a compact structure reinforced by dispersed steel fibre distributed throughout the entire volume. The mechanism of deformation and fracture of such a material differs significantly from that of conventional heavy concrete, which reduces the reliability of the rheological characteristics obtained analytically [9] and requires additional experimental studies [10].

Analysis of the publications [11–20] shows that the introduction of steel fibre has an effect on the rheological characteristics of steel fibre concrete. It is noted that in addition to the dispersed reinforcement parameters, the creep value is influenced by other con-



Fig. 1. A fragment of a room made of reinforced concrete blocks with non-removable SFRC formwork

ditions, specifically the age of the SFRC at the time of load application, its level (intensity), duration and environmental conditions (temperature and humidity), the type and content of the SFRC components (aggregate type, cement properties, cement dough content and water-cement ratio).

It is noted in [13] that the introduction of fiber does not change the nature of creep deformation, however, it affects their value. In studies [14, 18, 19], the creep deformations of the SFRC at any age were lower than those of matrix. Thus, the creep coefficient of especially high-strength SFRCs with a fiber content of 3 % (by volume) was 15–24 % less than that of conventional heavy concrete, and was 0.8–1.0 [19]. According to studies [18], the introduction of fibre reduced creep deformation by up to 30 %.

In [20] it is noted that the introduction of steel fibre in the volume of 0.8 % has an insignificant effect on the reduction of creep strain (not more than 12 %), but in these studies the content of fibre (by volume) did not exceed 0.8 %. In [21] it was found that the introduction of fibre may even increase creep deformation, which seems to be due to the loosening of the matrix structure by fibres of fibre during mixing and laying [3].

The results of the analysis of studies to assess the effect of fibre reinforcement on the creep of SFRC showed that the creep coefficient of SFRC is generally lower than that the one of matrix concrete. However, there are not enough systemic studies and consequently there are no recommendations for the standardization of these characteristics depend-

¹ SP 360.1325800.2017. Steel-fiber concrete structures. Design rules.

ing on the type and content of fibre. In addition, most of the research has been carried out on large fibre diameters (0.6 mm and higher), which is not applicable for thin-walled structures to which non-removable SFRC formwork belongs. Based on this, it was decided that a comprehensive study of the rheological characteristics of the SFRC should be carried out.

MATERIALS AND METHODS

All the studied SFRC compositions were made on the basis of the same self-consolidating matrix of fine-grained concrete. The matrix composition used (Table) resulted in a fine-grained concrete with a strength of 110 MPa (according to the results of testing samples of cubes with an edge of 70 mm).

During the research, types of fibre with optimal geometric parameters were used for the manufacture of panels with non-removable formwork (brass-plated with a diameter of 0.3 mm and a length of 15 and 30 mm). These types of fibre have shown their efficiency and manufacturability in the manufacture of formwork [2, 3]. Also, for comparison, fibre with diameter of 0.7 mm and length of 30 mm, which are widely used in the Russian Federation and abroad, was adopted. The fibre 15 mm long had a wave profile, and 30 mm long was smooth with anchors at the ends. The general view of the steel fibres used is shown in Fig. 2.

In studies of SFRC with wave fibre (FSPW 0.3 × 15), its content (by volume) was assumed to be 0.5, 1.0, 1.5, 3.0 and 6.0 %. The content of fibre with anchors (FSPA 0.3 × 30 and FSPA 0.7 × 30) due to technological limitations did not exceed 1.5 % (with a higher content of 0.3 × 30 FSPA fibres, lumps of fibres were formed during mixing).

Considering the analysis of the publications [11, 14, 16], creep tests for SFBC were carried out by analogy with GOST 24544–2020², despite the fact that it

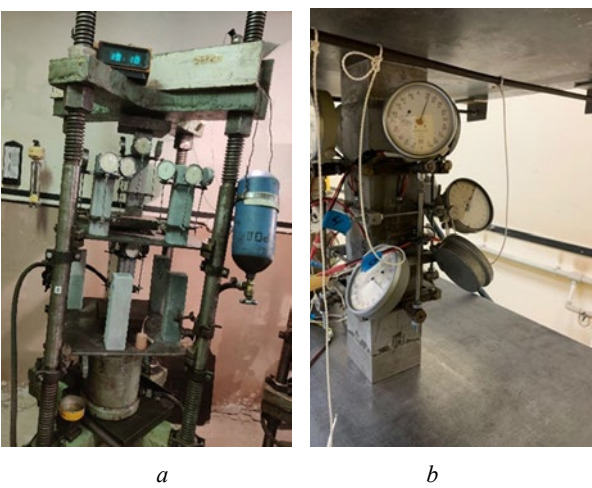


Fig. 3. Test operation: a — testing equipment; b — a sample during compression testing

applies only to concrete. After stripping, the samples were stored in a normal outcast chamber for 28 days. Then the samples were stored in a laboratory for 28 days to stabilize humidity. The age of the samples at the beginning of the creep test was about 56 days. Immediately before applying a long-term load, short-term tests were carried out, during which the cubic and prism strength of the SFBC was determined. Longitudinal and transverse deformations were also measured in the prism samples.

Pneumohydraulic installations were used for creep testing. Each installation consisted of a steel frame with a hydraulic jack (Fig. 3, a). The constant pressure in the jack was provided by an air-oil cylinder (battery) pre-pumped to the design pressure, which made it possible to compensate pressure drop during deformation of the samples. The values of longitudinal and transverse strains on the concrete surface were determined using an indicating gage

The composition of the matrix for the manufacture of SFRC, kg/m³

Cement CEM Type I 52.5	Sand	Water	Microsilicasuspension	Limestone powder	Poliplast PK plastisizer
666	1,005	208	67	344	13.32

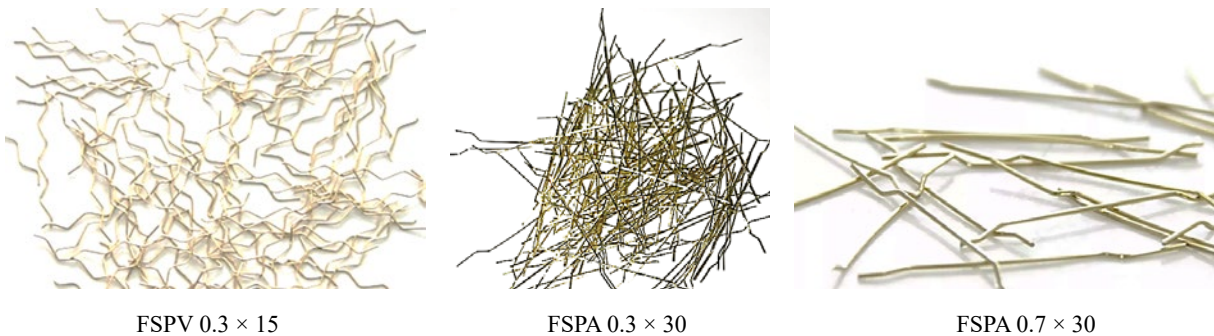


Fig. 2. Steel fibre types

² GOST 24544–2020. Concrete. Methods for determining shrinkage and creep deformations.

(division value 0.001 mm) installed on a 140 mm base (Fig. 3, b).

RESAERCH RESULTS

To determine the loading level for the creep test, static compression tests were previously carried out on the prism specimens. The test results are shown in Fig. 4.

The introduction of steel fibre practically did not affect the prismatic strength of the SFB (the difference did not exceed 8 %). At the same time, the nature of the change was the same for SFBC with an anchor fibre with a thickness of 0.3 and 0.7 mm and a length of 30 mm (FSPA 0.3 × 30 and FSPA 0.7 × 30).

The fracture pattern of the SFBC prism specimens from the different series did not differ much from each other. The destruction was generally associated with the formation of a vertical crack. At the same time, the destruction of the matrix occurred explosively, and during the SFBC test, the samples retained their shape. The values of the elastic modulus did not depend much on the fibre content and varied in the range from 38,000 to 43,000 MPa, the Poisson’s ratio was 0.20–0.23.

The stress in the samples during the creep test was 30 % of the prismatic strength of the SFRC, established during short-term load tests. During the test, the values of total strain for each loaded and unloaded sample were determined at the specified time.

The deformations were measured over a period of 180 days. Processing the measurement results, the average values of deformations for each sample were determined and a regression line was built according to them in accordance with the GOST 24544–2020 methodology. Then, the marginal creep deformations, i.e. deformations corresponding to an infinitely long loading time, were determined along the regression line.

The diagram of the effect of the parameters of dispersed reinforcement on the ultimate creep deformation (Fig. 5) shows that the introduction of steel fibre up to 1.5 % does not produce a clear trend. Obviously, this is due to the decompression of the structure of the material, which is a consequence of ad-

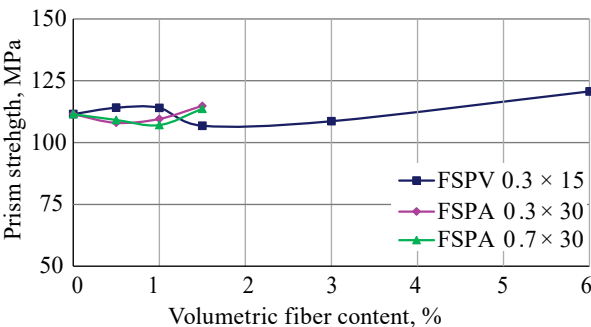


Fig. 4. Dependence of the prism strength of the SFBC on the volume content of the fiber

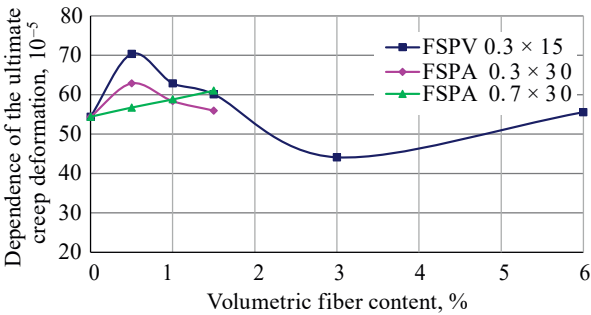


Fig. 5. Dependence of the ultimate creep deformation of the SFRC on the volume content of the fibre

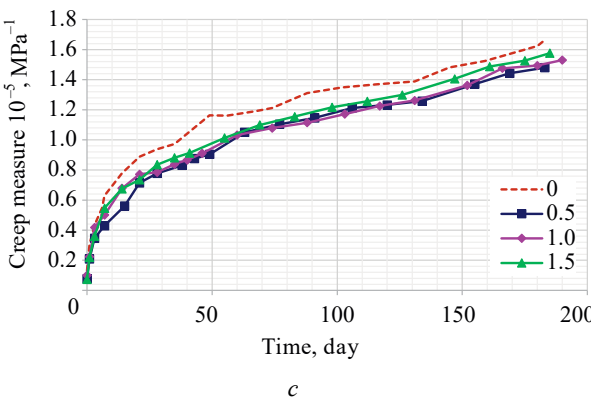
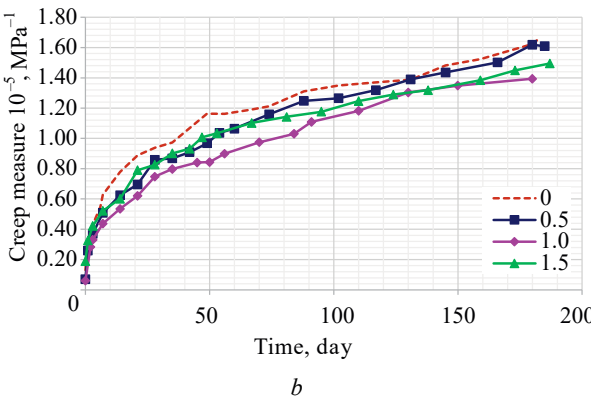
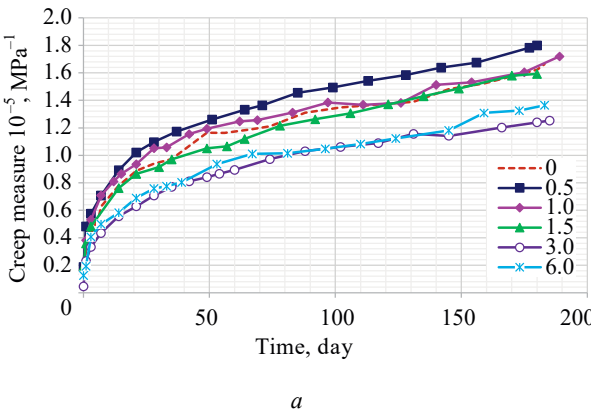


Fig. 6. Dependence of the creep measure with FB on the volume content of the fibre: a — FSPV 0.3 × 15; b — FSPA 0.3 × 30; c — FSPA 0.7 × 30

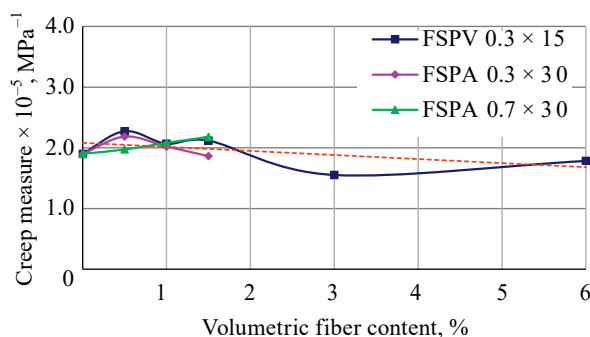


Fig. 7. Dependence of the creep measure with SFRC on the volume content of the fibre

ditional air entrainment, as it was noted by the results of the short-term load test and density determination. This is especially evident for thin fibres (diameter 0.3 mm) with the introduction of wave fibre (FSPW 0.3×15), creep deformations increase by more than 10 %. With a fibre content of more than 1.5 %, creep deformations decrease by 10–20 % compared to the matrix.

Diagrams of changes in the creep measure over time are shown in Fig. 6. The creep measure characterizes creep strain per unit stress (dimension MPa^{-1}) and is the most indicative characteristic. The prismatic strength of the studied SFB compositions differs, respectively, the stress values at which the deformations were measured are also different.

Calculations of the ultimate creep measure (Fig. 7) showed that the introduction of fibre reduces the creep parameters, which is associated with the containment of deformations in the concrete matrix by steel fibres. At the same time, a clear trend of a decrease in the creep coefficient was observed with a volumetric fibre content of more than 1.5 % (a decrease to 20 %). With a lower fibre content, the creep measure does not change (for VSP 0.7×30 fibre), or increases by 10–15 % (for FSPA 0.3×30 and FSPV 0.3×15 fibre).

CONCLUSION AND DISCUSSION

As a result of experimental studies at a load level of 0.3 of the destructive and normal environmental conditions, it was found that the maximum creep measure for SFRC is in the range of 1.5–2.3 MPa^{-1} .

The introduction of wave profile fibre (FSPW 0.3×15) and with anchors (SPA 0.3×30) up to 1.5 % by volume does not give a clear trend of change in the creep measure. For FSPA fibre 0.7×30 with an increase in its volume content, an increase in the creep measure by 10 % was revealed. The introduction of fibre from 1.5 to 6 % by volume reduces the creep limit of steel fibre concrete to 20 %.

The introduction of steel fibre contributes to additional air entrainment during the preparation of the mixture (noted by the results of measuring the physical and mechanical characteristics of the SFBC). In the creep test, this feature is evident at low percentages of reinforcement (up to 1.5 %), when the amount of fibre is not enough to compensate for the results of decompression of the fine-grained matrix. In this case, there is a decrease in the physical and mechanical characteristics of the SFRC (Fig. 4) and an increase in the creep strain limits (Fig. 5). The obtained values correlate with the results of the literature review, where contradictions in the effect of the introduction of steel fibres on the creep properties of the SFRC are noted.

The obtained results show that in addition to the parameters of dispersed reinforcement, other factors also influence the creep characteristics of SFBC. In the conducted researches, the influence of technological features in the mixture preparation — additional air entrainment during mixing with a volumetric fiber content of up to 1.5 % was noted. The additional air entrainment with a low fibre content is confirmed by creep determination. Accordingly, in determining the actual mechanical characteristics of SFRC, direct tests should be carried out, taking into account not only the composition, but also the manufacturing technology.

REFERENCES

1. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. *Questions of theory and design, technology, construction : monografiya*. Moscow, ASV Publ., 2011; 642. (rus.).
2. Dorf V.A., Krasnovskiy R.O., Kapustin D.E. On the way to the implementation of the technology for the construction of buildings and structures of nuclear power plants from reinforced concrete blocks with non-removable steel-fiber-reinforced concrete formwork. *Construction in the Nuclear Industry*. 2020; 1:47-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21641326> (rus.).
3. Kapustin D.E. *Strength and deformation characteristics of non-removable steel-fiber-reinforced concrete formwork as a bearing element of reinforced concrete structures*. Moscow, 2015; 211 (rus.).
4. Tamrazyan A.G. Rigidity of bending reinforced concrete elements taking into account nonlinear creep of high strengths concrete on the basis of is viscous-elastic model of hereditary ageing. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2011; 2(1):121-126. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17586454> (rus.).
5. Domarova E.V. Influence of creep on the stress-strain state of reinforced concrete multistory buildings. *Building and Reconstruction*. 2022; 3(101):14-22. URL: <https://construction.elpub.ru/jour/article/view/475> (rus.).

6. Bourne-Webb P.J. The role of concrete creep under sustained loading, during thermo-mechanical testing of energy piles. *Computers and Geotechnics*. 2020; 118:103309. DOI: 10.1016/j.compgeo.2019.103309
7. Torres P.P., Ghorbel E., Wardeh G. Towards a new analytical creep model for cement-based concrete using design standards approach. *Buildings*. 2021; 11:155. DOI: 10.3390/buildings11040155
8. Yuqi Zhou, Weiyi Chen, Peiyu Yan. Measurement and modeling of creep property of high-strength concrete considering stress relaxation effect. *Journal of Building Engineering*. 2022; 56(9):104726. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104726
9. Wang Hui, Wang Yue. Review on self-compacting concrete creep. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021; 634:012112. DOI 10.1088/1755-1315/634/1/012112
10. Moiseenko G.A. Changes in the prismatic strength and elastic modulus of high-strength steel fiber concrete and its matrix depending on the age. *Construction Materials*. 2020; 6:13-17. DOI: 10.31659/0585-430X-2020-781-6-13-17 (rus.).
11. Bezgodov I.M. Studies of the physical and mechanical characteristics of high-strength concretes. *Concrete Technologies*. 2022; 4(183):31-36. (rus.).
12. Vijaya kumar Setti, Dean kumar B., Swami B.L.P. Creep Strain Behaviour of Triple-Blended Steel Fiber Self-Compacting Concrete. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2022; 982(1):012010. DOI: 10.1088/1755-1315/982/1/012010
13. Muller H.S. Constitutive models for creep of concrete — from the past to the future. *Industrial and civil construction*. 2019; 3:55-69. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.55-69
14. Karpenko N.I., Kaprielov S.S., Petrov A.N. Study of physical-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber reinforced concrete from self-compacting mixtures. *Collection of scientific papers of the RAASN*. Moscow, 2018; 2:237-246. DOI: 10.22337/9785432302663-237-246 (rus.).
15. Kaprielov S.S., Chilin I.A. Ultra-high-strength self-compacting fiber-reinforced concrete for monolithic structures. *Construction Materials*. 2013; 7:28-30 (rus.).
16. Smirnov D.A., Kharlab V.D. Linear creep of mature fiber reinforced concrete. *Bulletin of Civil Engineers*. 2010; 4(25):56-60. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=15633247> (rus.).
17. Smirnov D.A. Calculation of steel fiber reinforced concrete statically indeterminate structures in view of creep. *Bulletin of Civil Engineers*. 2011; 3(28):51-54. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=17333079> (rus.).
18. Mangat P.S., Azari M.M. A theory for the creep of steel fibre reinforced cement compression. *Journal of Material Science*. 1985; 20:1119-1133. DOI: 10.1007/BF00585757
19. Elzaigh W.A. Steel concrete reinforced concrete ground slab. *University of Pretoria*. 2001; 2:2-1-2-25.
20. Nakov D. Experimental and Analytical Analysis of Creep of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2018; 62(1):226-231. DOI: 10.3311/PPci.11184
21. Balaguru P., Ramakrishnan V. Properties of fiber reinforced concrete: Workability, behaviour under long-term loading and air-void characteristics. *ACI Materials Journal*. 1988; 85(3):189-196. URL: <http://www.concrete.org/Publications/InternationalConcrete-AbstractsPortal.aspx?m=details&i=1849>

Received January 11, 2023.

Adopted in revised form on February 10, 2023.

Approved for publication on February 10, 2023.

BIONOTES: **Dmitriy E. Kapustin** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Facility Testing; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**; 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; SPIN-code: 6645-1159, Scopus: 57204881560, ORCID: 57204881560; kde90@bk.ru.