

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ EXPERIMENTAL RESEARCHES

DOI: 10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181

УДК 69.04

EDN: NHPHBS

Научная статья / Research article

### Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций

В.П. Агапов<sup>1</sup>, А.С. Маркович<sup>1,2</sup>, П. Дхар<sup>1</sup>, Д.А. Голишевская<sup>1</sup>✉<sup>1</sup> Российский университет дружбы народов, Москва, Россия<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

✉ miloserdova-da@rudn.ru

#### История статьи

Поступила в редакцию: 30 ноября 2023 г.

Доработана: 25 февраля 2024 г.

Принята к публикации: 14 марта 2024 г.

#### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии  
конфликта интересов.

#### Вклад авторов

Нераздельное соавторство.

**Аннотация.** Исследованы физико-механические характеристики сталефибробетона при сжатии, в том числе модуль упругости, коэффициент Пуассона, значения предельных деформаций при сжатии, величина прочности с различным процентом дисперсного армирования. Разработана и проведена программа экспериментальных исследований, которая включала в себя изготовление образцов-кубов, размером 100×100×100 мм, а также испытание на сжатие при статическом нагружении с учетом разгрузки из области неупругих деформаций. В качестве дисперсного армирования было выбрано два вида стальной фибры: анкерного и волнового профиля. Объемное содержание стального волокна в образцах кубов составляло 0,5, 1,0, 1,5 и 2,0 %. Получены прочностные и деформационные характеристики сталефибробетона при сжатии. На основе экспериментальных данных построены действительные диаграммы деформирования сталефибробетона с учетом типа армирующих волокон и процентного содержания армирующего волокна. На основе полученных диаграмм предложен закон деформирования сталефибробетона, который можно описать полиномиальной функцией четвертой степени с постоянными коэффициентами, определяющими вид кривой «напряжение — деформация». Приведенные результаты исследования могут быть использо-

**Агапов Владимир Павлович**, доктор технических наук, профессор департамента строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Российская Федерация; eLIBRARY SPIN-код: 2422-0104; ORCID: 0000-0002-1749-5797; E-mail: agapovpb@mail.ru

**Маркович Алексей Семенович**, кандидат технических наук, доцент департамента строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 9203-1434; ORCID: 0000-0003-3967-2114; E-mail: markovich-as@rudn.ru

**Дхар Прашанта**, кандидат технических наук, старший преподаватель департамента строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 5670-7662; ORCID: 0000-0002-7888-5350; E-mail: dkhar-p@rudn.ru

**Голишевская Дарья Александровна**, ассистент департамента строительства инженерной академии, Российский университет дружбы народов, Москва, Россия; eLIBRARY SPIN-код: 1276-6516; ORCID: 0000-0003-0835-528X; E-mail: miloserdova-da@rudn.ru

© Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А., 2024

 This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

ваны при разработке методики физически нелинейных расчетов сталефибробетонных элементов с процентом дисперсного армирования от 0,5 до 2,0 %.

**Ключевые слова:** сталефибробетон, стальное волокно, модуль упругости, предельная деформация, прочность на сжатие

#### Для цитирования

Агапов В.П., Маркович А.С., Дхар П., Голишевская Д.А. Напряженно-деформированное состояние сталефибробетона при сжатии с учетом разгрузки из области неупругих деформаций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2024. Т. 20. № 2. С. 170–181. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181>

## Stress-Strain State of Steel Fiber-Reinforced Concrete under Compression Taking into Account Unloading from Inelastic Region

Vladimir P. Agapov<sup>1</sup>, Alexey S. Markovich<sup>1,2</sup>, Prashanta Dkhar<sup>1</sup>, Darya A. Golishevskaya<sup>1</sup>✉

<sup>1</sup>RUDN University, Moscow, Russia

<sup>2</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

✉ miloserdova-da@rudn.ru

#### Article history

Received: November 30, 2023

Revised: February 25, 2024

Accepted: March 14, 2024

#### Conflicts of interest

The authors declare that there is no conflict of interest.

#### Authors' contribution

Undivided co-authorship.

**Abstract.** The purpose of the study is to examine the physical and mechanical characteristics of steel fiber-reinforced concrete under compression, including: modulus of elasticity, Poisson ratio, values of ultimate strains under compression, values of compressive strength with different percentages of dispersed reinforcement. An experimental investigation program, which included the production of cube samples measuring 100×100×100 mm, as well as a compression test under static loading, taking into account unloading from the region of inelastic deformations, was developed and carried out. Two types of steel fiber were chosen as dispersed reinforcement: hooked end and wave shape. The volume content of steel fiber in the cube samples was 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0 %. As a result of the investigation, the strength and deformation characteristics of steel fiber reinforced concrete under compression were obtained. Based on the experimental data, actual strain diagrams of steel fiber reinforced concrete were constructed, taking into account the type of reinforcing fibers and the percentage of reinforcing fiber. Based on the obtained diagrams, a law of deformation of steel fiber reinforced concrete is proposed, which can be described by a polynomial function of the fourth order with constant coefficients that determine the shape of the stress-strain curve. The presented research results can be used in developing a methodology for physically nonlinear analysis of steel fiber reinforced concrete elements with a percentage of dispersed reinforcement from 0.5 to 2.0 %.

**Keywords:** steel fiber-reinforced concrete, steel fiber, modulus of elasticity, ultimate strain, compressive strength

#### For citation

Agapov V.P., Markovich A.S., Dkhar P., Golishevskaya D.A. Stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete under compression taking into account unloading from inelastic region. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2024;20(2):170–181. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2024-20-2-170-181>

**Vladimir P. Agapov**, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Civil Engineering, Engineering Academy, RUDN University, Moscow, Russian Federation; eLIBRARY SPIN-code: 2422-0104; ORCID: 0000-0002-1749-5797; E-mail: agapovpb@mail.ru

**Alexey S. Markovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 9203-1434; ORCID: 0000-0003-3967-2114; E-mail: markovich-as@rudn.ru

**Prashanta Dkhar**, Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 5670-7662; ORCID: 0000-0002-7888-5350; E-mail: dkhar-p@rudn.ru

**Darya A. Golishevskaya**, Assistant of the Department of Civil Engineering, Academy of Engineering, RUDN University, Moscow, Russia; eLIBRARY SPIN-code: 1276-6516; ORCID: 0000-0003-0835-528X; miloserdova-da@rudn.ru

## 1. Введение

Дисперсно-армированный бетон представляет собой сложный композиционный материал. Для увеличения физико-механических характеристик бетонов используются различные волокна (стальные, базальтовые, стеклянные, углеродные, полипропиленовые и т.д.) [1–3]. Следует отметить, что существенный практический интерес для эффективного использования в строительной области представляет исследование свойств образцов, полученных на основе стального волокна, что отражено в [3–6].

В [6–9] установлено, что рабочий диапазон объемного содержания стального волокна в дисперсно-армированном бетоне принимается не более 2,5...3,0 %. Более высокий процент армирования не всегда является обоснованным и может привести к снижению прочности [7].

В работах зарубежных и отечественных исследователей отмечено, что добавление стальных волокон в состав бетона значительно увеличивает его прочностные показатели. Прочность сталефибробетона на сжатие повышается на 10...15 % относительно обычного бетона такого же класса при содержании стального волокна до 2,5 % [10–18]. Однако, проведя анализ существующих работ [4–21], можно отметить, что в настоящее время физико-механические характеристики сталефибробетона ещё недостаточно подкреплены экспериментальными данными, в частности, имеется недостаток исследований напряженно-деформированного состояния сталефибробетона с учетом его разгрузки из области неупругих деформаций.

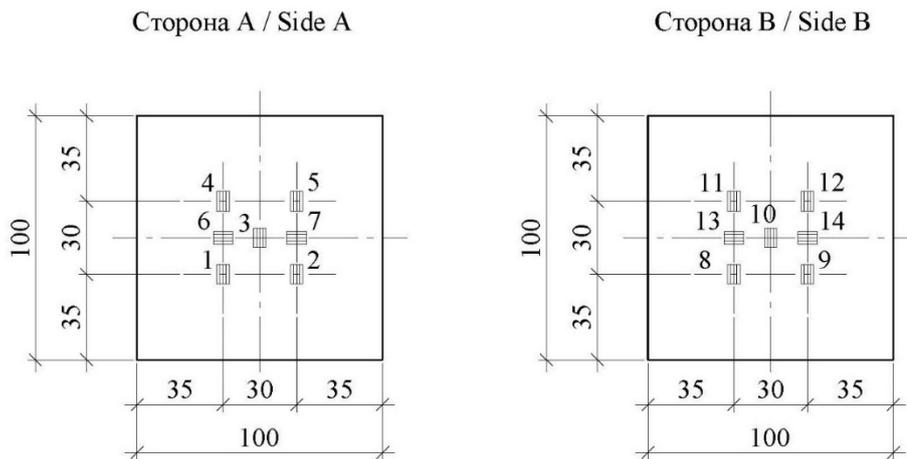
В статье особое внимание уделено экспериментальному исследованию сталефибробетона на сжатие с учетом разгрузки из области неупругих деформаций с рациональным содержанием фибрового волокна в пределах от 0,5 до 2 %.

## 2. Метод

Для исследования прочностных и деформативных характеристик сталефибробетона при сжатии были проведены эксперименты, выполненные авторами в лаборатории строительных конструкций и материалов департамента строительства инженерной академии РУДН. Объектом исследования являлись образцы-кубы размером 100×100×100 мм. Для эксперимента было изготовлено 4 партии образцов с применением стального волокна анкерного типа (диаметр 0,3 мм и длина 30 мм) и 4 партии — с применением стального волокна волнового типа (диаметр 0,3 мм и длина 22 мм). Количество стального волокна в образцах увеличивалось от 0,5 до 2 % по объему. Все образцы имели одинаковый состав бетонной матрицы: Ц:П:Щ=1:1,2:1,6 при В:Ц=0,45 и расходе пластифицирующей добавки 1,5 % от массы цемента. Количество образцов-кубов в одной партии составило 6 шт. Итого было изготовлено 48 дисперсно-армированных образцов-кубов.

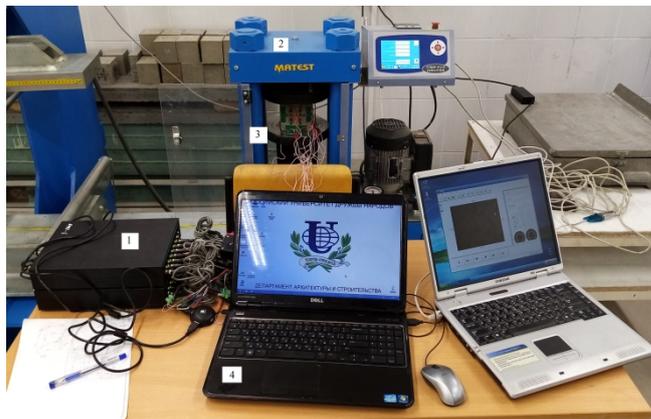
Получение действительных диаграмм деформирования при стандартных испытаниях с применением индикаторов часового типа сопровождается рядом технических трудностей и сложностей регистрации деформаций во времени одновременно в несколько точек. Таким образом, данные, полученные при таком типе измерения, могут иметь серьезные погрешности [22–23]. В нашем случае применялась методика, согласно которой в процессе испытаний в реальном времени синхронно с нагрузкой регистрировались продольные и поперечные деформации образца. Испытание образцов производилось на испытательной установке Matest по Межгосударственному стандарту ГОСТ 10180-2012<sup>1</sup>. Для измерения деформаций на смежные грани контрольных образцов-кубов были наклеены по 7 тензорезисторов ВХ 120-5АА так, чтобы направление их базы совпадало с направлением измеряемой деформации (рис. 1). Тензорезисторы были подключены к 32-канальной тензометрической станции ZETLAB по полной мостовой схеме (рис. 2).

<sup>1</sup> ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. М.: Стандартинформ, 2018. 32 с. URL: <http://www.nppskmost.ru/files/gost-10180-2012.pdf> (дата обращения: 15.07.2023).



**Рис. 1.** Схема расположения тензорезисторов на гранях образцов-кубов  
И с т о ч н и к : выполнено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

**Figure 1.** Arrangement of strain gauges on the faces of sample cubes  
S o u r c e : compiled by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja



**Рис. 2.** Подключение тензорезисторов к многоканальной тензометрической станции:  
1 — тензометрическая станция Zetlab ZET 017-T32; 2 — гидравлический пресс Matest;  
3 — образец-куб с тензорезисторами BX 120-5AA; 4 — персональный компьютер

И с т о ч н и к : фото А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

**Figure 2.** Connecting strain gauges to a multichannel strain gauge station:  
1 — Zetlab ZET 017-T32 strain gauge station; 2 — Matest hydraulic press;  
3 — sample cube with BX 120-5AA strain gauges; 4 — personal computer  
S o u r c e : photo by A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

Для построения диаграммы деформирования с учетом разгрузки из области неупругих деформаций и определения остаточных деформаций сталефибробетона образцы нагружались до заданного уровня напряжений, составляющих 60 % от разрушающих. После этого производилась полная разгрузка.

### 3. Результаты и обсуждение

Характер разрушения образцов представлен на рис. 3. В ходе экспериментов были определены следующие физико-механические характеристики сталефибробетона: прочность на сжатие, начальный модуль упругости, предельная деформация и коэффициент Пуассона. Результаты испытаний приведены в табл. 1.



**Рис. 3.** Разрушенные образцы-кубы  
 Источник: фото А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской  
**Figure 3.** Destroyed sample cubes  
 Source: photo by A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

Таблица 1

**Результаты испытаний по определению прочности на сжатие сталефибробетонных образцов-кубов**

Тип стального волокна	Количество стального волокна $\mu_f$ , %	Кубиковая прочность на сжатие $R_{fb}$ , МПа	Призменная прочность на сжатие $R_{fb}'$ , МПа	Предельная деформация $\epsilon_{ufbc}$	Начальный модуль упругости $E_b$ , МПа $\times 10^{-3}$
Бетон без фибры	0	55,00	39,5	0,00200	39,00
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	0,5	59,65	42,37	0,00172	44,98
	1,0	62,13	43,98	0,00160	49,41
	1,5	64,33	45,40	0,00156	49,88
	2,0	66,55	46,81	0,00154	51,71
Фибра проволочная волновая 0,3/22	0,5	57,75	41,13	0,00194	41,81
	1,0	59,21	42,09	0,00191	43,43
	1,5	60,47	42,91	0,00186	45,32
	2,0	62,20	44,03	0,00182	48,16

Источник: составлено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

Table 1

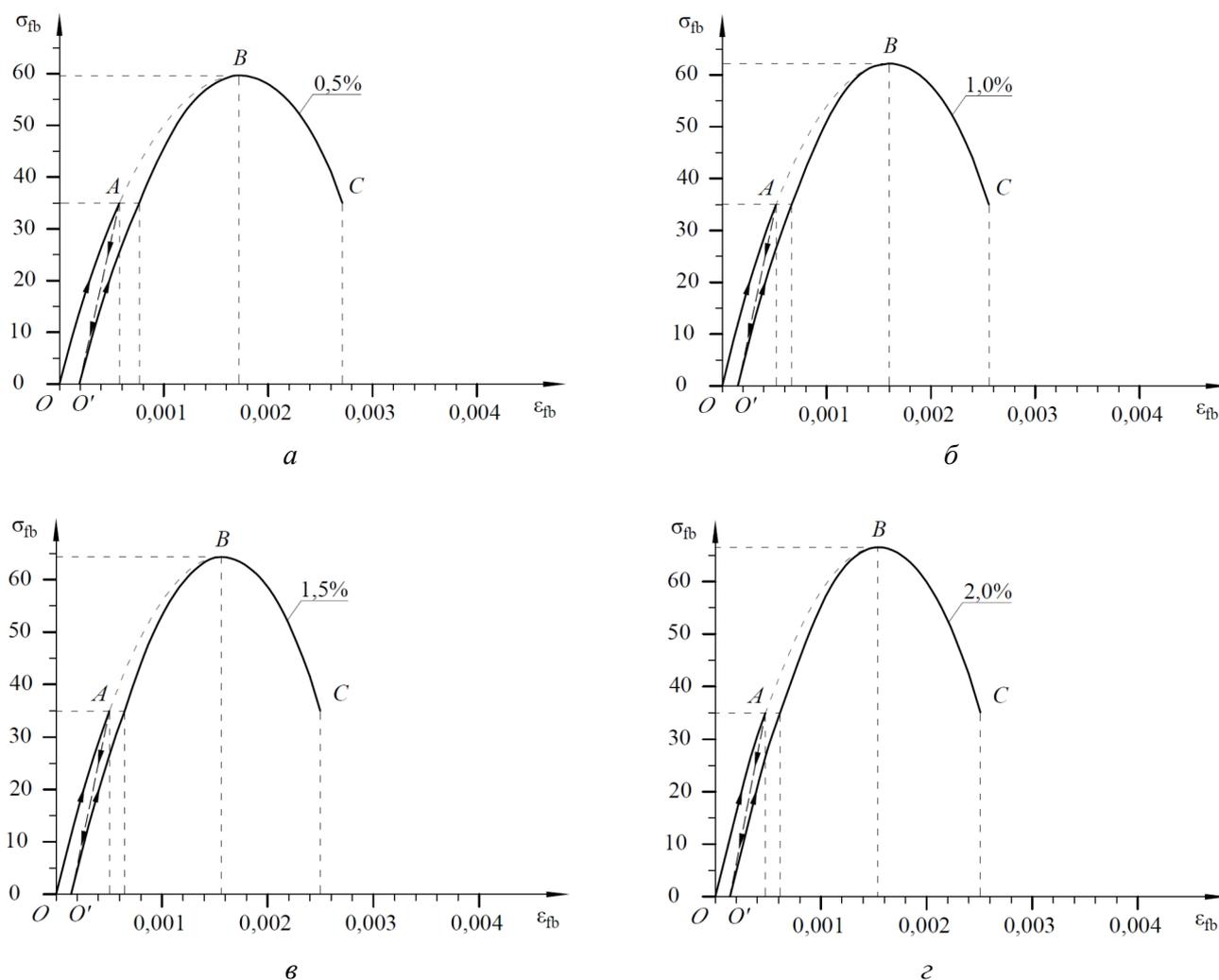
**The results of compression tests of steel fiber-reinforced concrete**

Type of steel fiber	Content of steel fiber $\mu_f$ , %	Cube compressive strength $R_{fb}$ , МПа	Prism compressive strength $R_{fb}'$ , МПа	Ultimate strain $\epsilon_{ufbc}$	Tangent modulus of elasticity $E_b$ , МПа $\times 10^{-3}$
Concrete without fiber	0	55.00	39.5	0.00200	39.00
Hooked end wire fiber 0.3/30	0.5	59.65	42.37	0.00172	44.98
	1.0	62.13	43.98	0.00160	49.41
	1.5	64.33	45.40	0.00156	49.88
	2.0	66.55	46.81	0.00154	51.71
Wave wire fiber 0.3/22	0.5	57.75	41.13	0.00194	41.81
	1.0	59.21	42.09	0.00191	43.43
	1.5	60.47	42.91	0.00186	45.32
	2.0	62.20	44.03	0.00182	48.16

Source: made by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что при увеличении дисперсного армирования прочность сталефибробетона при сжатии растет с увеличением объемного содержания стального волокна. Увеличение процента армирования до 2 % позволяет повысить прочность сталефибробетона на сжатие на 21 % при использовании анкерной фибры и на 13 % при использовании волновой. Предельная деформация образцов при сжатии уменьшается с увеличением объемного содержания стального волокна: так, при 2 % армировании предельная деформация уменьшается на 23 % для анкерной фибры и на 9 % для волновой. По полученным результатам установлено, что начальный модуль упругости сталефибробетона увеличивается на 33% при использовании анкерной фибры и на 23,5 % при применении волновой при максимальном проценте армирования в 2 %. Полученные данные согласуются с результатами работ других исследователей [5; 7; 10–18; 23].

На рис. 4 и 5 представлены осредненные диаграммы деформирования образцов из сталефибробетона с ветвями нагрузки и разгрузки, отражающими действительный характер работы материала с учетом типа армирующих волокон и процентного содержания армирующего волокна.

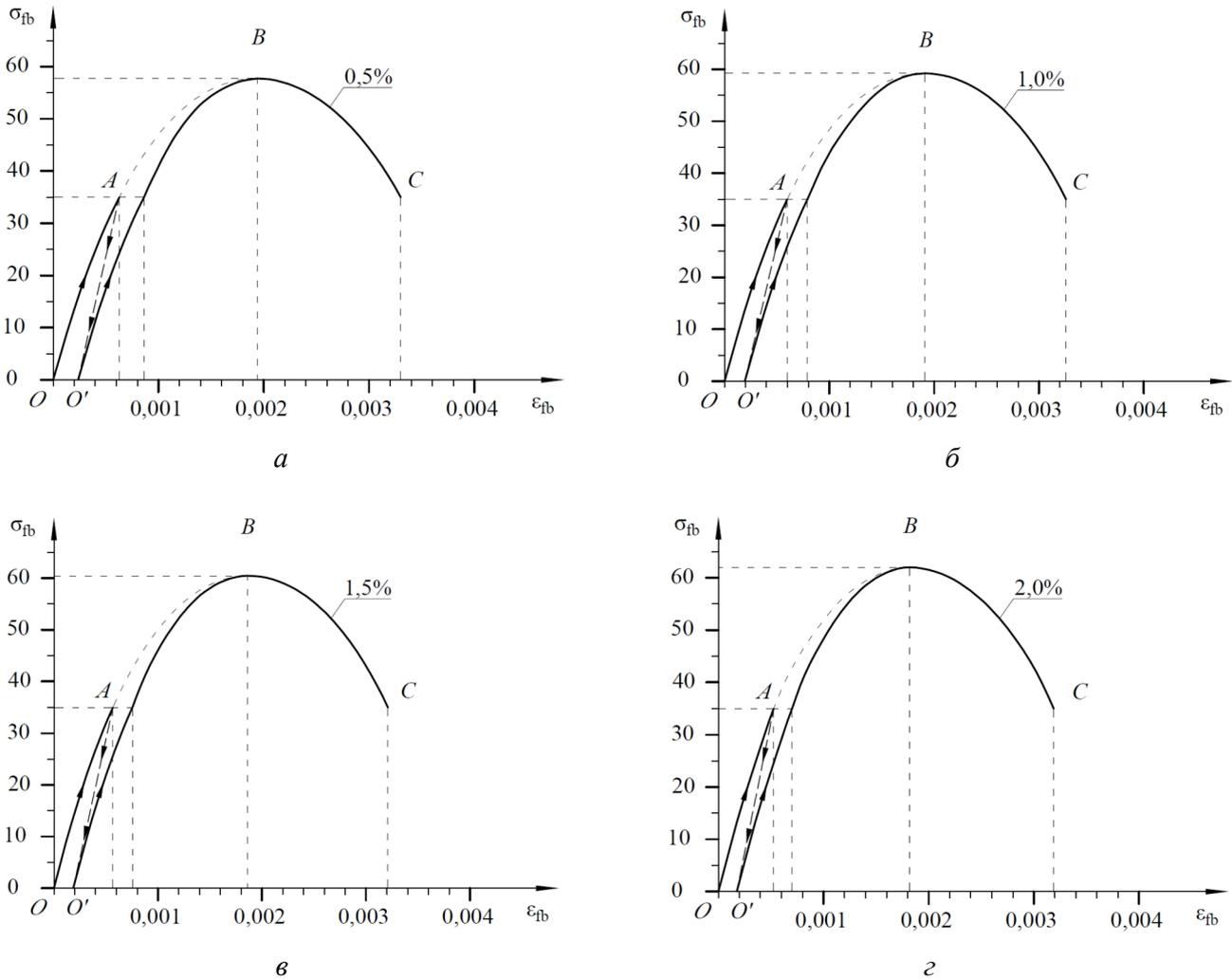


**Рис. 4.** Диаграмма деформирования дисперсно-армированного бетона с ветвью нагрузки и разгрузки образцов-кубов с фиброй проволочной анкерной:  
 $a — \mu_f = 0,5 \%$ ;  $б — \mu_f = 1 \%$ ;  $в — \mu_f = 1,5 \%$ ;  $г — \mu_f = 2 \%$

И с т о ч н и к: выполнено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

**Figure 4.** Diagram of deformation of fiber-reinforced concrete with a branch of loading and unloading of sample cubes with hooked end wire fiber:  
 $a — \mu_f = 0.5 \%$ ;  $б — \mu_f = 1 \%$ ;  $в — \mu_f = 1.5 \%$ ;  $г — \mu_f = 2 \%$

S o u r c e: compiled by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja



**Рис. 5.** Диаграмма деформирования дисперсно-армированного бетона с ветвью нагрузки и разгрузки образцов-кубов с фиброй проволоочной волновой:  
 а —  $\mu_f = 0,5 \%$ ; б —  $\mu_f = 1 \%$ ; в —  $\mu_f = 1,5 \%$ ; з —  $\mu_f = 2 \%$   
 И с т о ч н и к: выполнено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

**Figure 5.** Diagram of deformation of fiber-reinforced concrete with a branch of loading and unloading of sample cubes with wave wire fiber  
 а —  $\mu_f = 0.5 \%$ ; б —  $\mu_f = 1 \%$ ; в —  $\mu_f = 1.5 \%$ ; з —  $\mu_f = 2 \%$   
 S o u r c e: compiled by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

На представленных выше диаграммах (см. рис. 4, 5) ветвь  $OA$  соответствует первоначальному нагружению до нагрузки, составляющей 60 % от разрушающей (350 кН). Ветвь  $OA'$  соответствует разгрузке образца-куба. Отрезок  $OO'$  указывает на остаточные деформации. Ветвь  $O-A-O'$  описывает собой неполную петлю гистерезиса. Точка  $B$ , находящаяся на вершине диаграммы, соответствует разрушающей нагрузке  $R_{fb}$  и предельной деформации  $\epsilon_{ufbc}$ . Кривая  $BC$  характеризует ниспадающую ветвь диаграммы.

Анализируя полученные диаграммы деформирования (см. рис. 4, 5), можно отметить, что вершина диаграммы смещается вверх и влево, а угол касательной к наклону кривой в начале координат увеличивается с увеличением процентного содержания волокна в составе бетона.

На основании обработки полученных экспериментальных данных получена аналитическая зависимость между напряжениями и деформациями сталефибробетона при сжатии, которая аппроксимируется полиномиальной функцией четвертой степени [25]:

$$\sigma_{fb} = \alpha_1 \varepsilon_{fb} + \alpha_2 \varepsilon_{fb}^2 + \alpha_3 \varepsilon_{fb}^3 + \alpha_4 \varepsilon_{fb}^4, \quad (1)$$

где  $\sigma_{fb}$  — нормальные напряжения сжатия;  $\varepsilon_{fb}$  — продольные деформации;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$  — постоянные коэффициенты, которые зависят от процентного содержания стального волокна и типа профиля.

Коэффициенты  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ , определяющие вид диаграммы деформирования, приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Коэффициенты аппроксимирующей функции  $\sigma$ - $\varepsilon$  дисперсно-армированного бетона на сжатие в зависимости от типа профиля и количества стального волокна**

Тип стального волокна	Постоянные коэффициенты уравнения, $\times 10^6$	Количество стального волокна $\mu_f$ , %			
		0,5	1,0	1,5	2,0
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	$\alpha_1$	0,0794	0,0855	0,0833	0,0860
	$\alpha_2$	-37,1	-37,8	-29,1	-29,1
	$\alpha_3$	9590	7630	2280	1860
	$\alpha_4$	-1810000	-1400000	-625000	-671000
Фибра проволочная волновая 0,3/22	$\alpha_1$	0,0742	0,0775	0,0809	0,0862
	$\alpha_2$	-33,4	-36,1	-38,6	-42,6
	$\alpha_3$	7030	8110	8840	10000
	$\alpha_4$	-83100	-1010000	-1130000	-1260000

И с т о ч н и к : составлено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

Table 2

**$\sigma$ - $\varepsilon$  approximation function coefficients of fiber-reinforced concrete under compression, depending on the shape and the content of steel fiber**

Type of steel fiber	Constant function coefficients, $\times 10^6$	Content of steel fiber $\mu_f$ , %			
		0.5	1.0	1.5	2.0
Hooked end wire fiber 0.3/30	$\alpha_1$	0.0794	0.0855	0.0833	0.0860
	$\alpha_2$	-37.1	-37.8	-29.1	-29.1
	$\alpha_3$	9590	7630	2280	1860
	$\alpha_4$	-1810000	-1400000	-625000	-671000
Wave wire fiber 0.3/22	$\alpha_1$	0.0742	0.0775	0.0809	0.0862
	$\alpha_2$	-33.4	-36.1	-38.6	-42.6
	$\alpha_3$	7030	8110	8840	10000
	$\alpha_4$	-83100	-1010000	-1130000	-1260000

S o u r c e : made by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

Значения остаточных деформаций сталефибробетона с различным процентом содержания анкерной и волной фибры, представлены в табл. 3. Значения коэффициента Пуассона испытываемых образцов приведены в табл. 4.

Таблица 3

**Относительные остаточные деформации сталефибробетона на сжатие**

Тип стального волокна	Относительная остаточная деформация дисперсно-армированного бетона $\epsilon_{plfb} \times 10^3$			
	Количество стального волокна $\mu_f, \%$			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	0,190	0,150	0,143	0,138
Фибра проволочная волновая 0,3/22	0,236	0,193	0,186	0,175

И с т о ч н и к : составлено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

Table 3

**Relative residual deformation of fiber-reinforced concrete under compression**

Type of steel fiber	Relative residual deformation of fiber-reinforced concrete $\epsilon_{plfb} \times 10^3$			
	Content of steel fiber $\mu_f, \%$			
	0.5	1.0	1.5	2.0
Hooked end wire fiber 0.3/30	0.190	0.150	0.143	0.138
Wave wire fiber 0.3/22	0.236	0.193	0.186	0.175

S o u r c e : made by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

Таблица 4

**Значения коэффициента поперечной деформации ( $\nu$ ) на шагах нагружения**

$\sigma_{fb} / R_{fb}$	0,24	0,44	0,61	0,74	0,84	0,92	0,97	1,00
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	0,26	0,26	0,28	0,33	0,37	0,48	0,51	0,70
Фибра проволочная волновая 0,3/22	0,24	0,24	0,26	0,29	0,34	0,45	0,62	0,68

И с т о ч н и к : составлено В.П. Агаповым, А.С. Марковичем, Д.А. Голишевской

Table 4

**Values of the coefficient of transverse deformation ( $\nu$ ) at loading steps**

$\sigma_{fb} / R_{fb}$	0.24	0.44	0.61	0.74	0.84	0.92	0.97	1.00
Hooked end wire fiber 0.3/30	0.26	0.26	0.28	0.33	0.37	0.48	0.51	0.70
Wave wire fiber 0.3/22	0.24	0.24	0.26	0.29	0.34	0.45	0.62	0.68

S o u r c e : made by V.P. Agapov, A.S. Markovich, D.A. Golishevskaja

**4. Заключение**

1. На основании проведенных исследований можно сделать вывод о характере сдерживания стальными волокнами продольных и поперечных деформаций бетона. Явно выражен эффект перераспределения усилий в материале, а именно: с увеличением деформаций стальные волокна снимают часть нагрузки с бетонной матрицы, тем самым повышается верхняя граница трещинообразования.

2. Проведенные опыты показали, что использование анкерной фибры в качестве дисперсного армирования бетона оказывается более эффективным, чем волновой.

3. На основании полученных действительных диаграмм деформирования образцов на сжатие предложена зависимость между напряжениями и деформациями в виде полиномиальной функции четвертой степени с постоянными коэффициентами, определяющими вид диаграммы в зависимости от типа армирующих волокон и их процентного содержания.

### Список литературы

1. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: монография. М.: Издательство АСВ, 2011. 642 с. EDN: QNPRVR
2. Маркович А.С., Милосердова Д.А. Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 2. С. 182–192. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192>
3. Пухаренко Ю.В., Аубакирова И.У., Скобликов В.А., Летенко Д.Г., Никитин В.А., Чарыков Н.А. Применение наносистем при получении сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. 2011. № 3 (28). С. 77–81. EDN: ОРНУОТ
4. Ключев А.В. Сталефибробетон для сборно-монолитного строительства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 2. С. 60–63. EDN: NYATIP
5. Талантова К.В., Михеев Н.М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций // Ползуновский вестник. 2011. № 1. С. 194–198. EDN: OCSKFP
6. Горохов М.С. Трещиностойкость фибробетона со стальной анкерной фиброй // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2014. № 5 (27). С. 47–53. EDN: SWLTOF
7. Маркович А.С., Милосердова Д.А. Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 2. С. 182–192. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192>
8. Хегай А.О., Кириллин Н.М., Хегай Т.С., Хегай О.Н. Экспериментальные исследования деформативных свойств сталефибробетона повышенных классов // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 6 (83). С. 77–82. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82>
9. Карпенко Н.И., Моисеенко Г.А. Свойства высокопрочного сталефибробетона с минимальным эффективным содержанием фибры при нагружениях различной длительности // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022. Т. 18. № 6. С. 503–514. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-503-514>
10. Yoo D.-Y., Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete – A review // Cement and Concrete Composites. 2019. Vol. 104. No. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389>
11. Yusuf M.S., Isak A.B., Mohamud G.A., Warsame A.H., Osman Y.I., Ibrahim A.H., Elmi, L.A.A. Effect of Steel Fiber on Concrete's Compressive Strength // Open Journal of Civil Engineering. 2023. Vol. 13. P. 192–197. <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.131014>
12. Zhao M., Li C., Li J., Yue L. Experimental Study on the Performance of Steel-Fiber-Reinforced Concrete for Remote-Pumping Construction // Materials. 2023. Vol. 16. No. 10. <https://doi.org/10.3390/ma16103666>
13. Ding X., Zhao M., Zhou S., Fu Y., Li C. Statistical Analysis and Preliminary Study on the Mix Proportion Design of Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete // Materials. 2019. Vol. 12. No. 4. <https://doi.org/10.3390/ma12040637>
14. Mohtasham Moein M., Saradar A., Rahmati K., Hatami Shirkouh A., Sadrinejad I., Aramali V., Karakouzian M. Investigation of Impact Resistance of High-Strength Portland Cement Concrete Containing Steel Fibers // Materials. 2022. Vol. 15. No. 20. <https://doi.org/10.3390/ma15207157>
15. More F.M.D.S., Subramanian S.S. Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete // Buildings. 2022. Vol. 12. No. 9. <https://doi.org/10.3390/buildings12091436>
16. Alrawashdeh A., Eren O. Mechanical and physical characterisation of steel fibre reinforced self-compacting concrete: Different aspect ratios and volume fractions of fibres // Results in Engineering. 2022. Vol. 13. P. 100335. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100335>
17. Khan M., Cao M., Xie C., Ali M. Effectiveness of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete under compression // Case Studies in Construction Materials. 2022. Vol. 16. P. e00941. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00941>
18. Hrabová K., Lánik J., Lehner P. Statistical and Practical Evaluation of the Mechanical and Fracture Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete // Buildings. 2022. Vol. 1. No. 8. P. 1082. <https://doi.org/10.3390/buildings12081082>
19. Moiseenko G.A. Method for construction of isochron diagrams of high-strength steel fiber concrete and its matrix // Строительство и реконструкция. 2020. № 5 (91). С. 32–45. <http://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-90-4-32-45>

20. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Abakarov A.D., Shorstova E.S., Gafarova N.G. The effect of particulate reinforcement on strength and deformation characteristics of fine-grained concrete // *Magazine of Civil Engineering*. 2017. No. 7. P. 66–75. <https://doi.org/10.18720/MCE.75.6>

21. Лесовик Р.В., Ключев А.В., Ключев С.В. Мелкозернистый сталефибробетон на основе техногенного песка для получения сборных элементов конструкций // *Технологии бетонов*. 2014. Т. 2. № 14. С. 44–45. EDN: SZTHMX

22. Сидоров В.Н., Акимов П.А., Хегай А.О. Экспериментальные исследования высокопрочного фибробетона и прикладные вопросы численного расчета строительных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4-2. С. 427–435.

23. Степанов М.В., Моисеенко Г.А. Диаграммы деформирования мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при сжатии // *Строительство и реконструкция*. 2019. № 3 (83). С. 11–21. <http://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-83-3-11-21>

24. Тамов М.М., Салиб М.И.Ф., Абузеих Ю.К.И., Софьяников О.Д. Подбор составов и исследование прочностных характеристик самоуплотняющегося сверхвысокопрочного сталефибробетона // *Известия высших учебных заведений // Строительство*. 2022. № 4 (760). С. 25–39. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39>

25. Hu L., Li S., Zhu J., Yang X. Mathematical Model of Constitutive Relation and Failure Criteria of Plastic Concrete under True Triaxial Compressive Stress // *Materials*. 2021. Vol. 14 (1). P. 102. <https://doi.org/10.3390/ma14010102>

## References

1. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, constructions: monograph. Moscow: ASV Publ.; 2011. (In Russ.) EDN: QNPRVR

2. Markovich A.S., Miloserdova D.A. Properties of dispersed fibers for efficient concrete reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(2):182–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192>

3. Pukharenko Yu.V., Aubakirova I.U., Skoblikov V.A., Letenko D.G., Nikitin V.A., Charykov N.A. Application of nanosystems in the steel fibrous concrete production. *Bulletin of civil engineers*. 2011;3(28):77–81. (In Russ.) EDN: OPHUOT

4. Kluev A.V. Steel fiber reinforced concrete for prefabricated monolithic construction. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011;(2):60–63. (In Russ.) EDN: NYATIP

5. Talantova K.V., Mikheev N.M. A kinetic study of the alcoholic fermentation reaction using a pine nut shell as a packing element. *Polzunovskij vestnik*. 2011;(1):194–198. (In Russ.) EDN: OCSKFP

6. Gorokhov M.S. Crack resistance of fiber-reinforced concrete with steel anchor fiber. *Bulletin of the State University of Marine and River Fleet named after Admiral S. O. Makarov*. 2014;5(27):47-53. (In Russ.) EDN: SWLTOF

7. Markovich A.S., Miloserdova D.A. Properties of dispersed fibers for efficient concrete reinforcement. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(2):182–192. (In Russ.) <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192>

8. Khagai A.O., Kirilin N.M., Khagai T.S., Khagai O.N. Experimental investigation of stress-strain properties of steel fiber reinforced concrete of the higher classes. *Bulletin of civil engineers*. 2020;6(83):77–82. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2020-17-6-77-82>

9. Karpenko N.I., Moiseenko G.A. Investigation of the properties of high-strength steel fiber concrete with a minimum effective fiber content under loads of various durations. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2022;18(6):503–514. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-6-503-514>

10. Yoo D.-Y., Banthia N. Impact resistance of fiber-reinforced concrete — A review. *Cement and Concrete Composites*. 2019;104:2019. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103389>

11. Yusuf M.S., Isak A.B., Mohamud G.A., Warsame A.H., Osman Y.I., Ibrahim A.H., Elmi L.A.A. Effect of Steel Fiber on Concrete's Compressive Strength. *Open Journal of Civil Engineering*. 2023;13:192–197. <https://doi.org/10.4236/ojce.2023.131014>

12. Zhao M., Li C., Li J., Yue L. Experimental Study on the Performance of Steel-Fiber-Reinforced Concrete for Remote-Pumping Construction. *Materials*. 2023;16(10):3666. <https://doi.org/10.3390/ma16103666>

13. Ding X., Zhao M., Zhou S., Fu Y., Li C. Statistical Analysis and Preliminary Study on the Mix Proportion Design of Self-Compacting Steel Fiber Reinforced Concrete. *Materials*. 2019;12(4):637. <https://doi.org/10.3390/ma12040637>

14. Mohtasham Moein M., Saradar A., Rahmati K., Hatami Shirkouh A., Sadrinejad I., Aramali V., Karakouzian M. Investigation of Impact Resistance of High-Strength Portland Cement Concrete Containing Steel Fibers. *Materials*. 2022; 15(20):7157. <https://doi.org/10.3390/ma15207157>

15. More F.M.D.S., Subramanian S.S. Impact of Fibres on the Mechanical and Durable Behaviour of Fibre-Reinforced Concrete. *Buildings*. 2022;12(9):1436. <https://doi.org/10.3390/buildings12091436>

16. Alrawashdeh A., Eren O. Mechanical and physical characterisation of steel fibre reinforced self-compacting concrete: Different aspect ratios and volume fractions of fibres. *Results in Engineering*. 2022;13:100335. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100335>
17. Khan M., Cao M., Xie C., Ali M. Effectiveness of hybrid steel-basalt fiber reinforced concrete under compression. *Case Studies in Construction Materials*. 2022;16:e00941. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00941>
18. Hrabová K., Láník J., Lehner P. Statistical and Practical Evaluation of the Mechanical and Fracture Properties of Steel Fibre Reinforced Concrete. *Buildings*. 2022;12(8):1082. <https://doi.org/10.3390/buildings12081082>
19. Moiseenko G.A. Method for construction of isochron diagrams of high-strength steel fiber concrete and its matrix. *Building and Reconstruction*. 2020;(5):32–45. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2020-90-4-32-45>
20. Klyuev S.V., Klyuev A.V., Abakarov A.D., Shorstova E.S., Gafarova N.G. The effect of particulate reinforcement on strength and deformation characteristics of fine-grained concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2017;7:66–75. <https://doi.org/10.18720/MCE.75.6>
21. Lesovik R.V., Klyuev A.V., Klyuev S.V. Finegrained steel fiber concrete based on the sand of a technogenic to obtain prefabricated structures. *Concrete Technologies*. 2014;4(2):44–45. (In Russ.) EDN: SZTHMX
22. Sidorov V.N., Akimov P.A., Hegai A.O. Experimental researches of high-strength fibro-concrete and applied problems of structural analysis. *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*. 2010;4(2):427–435. (In Russ.)
23. Stepanov M.V., Moiseenko G.A. Deformation diagrams of fine-grained high-strength concrete and high-strength steel-fibro concrete under compression. *Building and reconstruction*. 2019;3(83):11–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-83-3-11-21>
24. Tamov M.M., Salib M.I.F., Abuizeh Y.Q.Y., Sofianikov O.D. Mix design and study of strength properties of self-compacting ultra high-performance fiber-reinforced concrete. *News of higher educational institutions. Construction*. 2022;4(760):25–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-760-4-25-39>
25. Hu L., Li S., Zhu J., Yang X. Mathematical Model of Constitutive Relation and Failure Criteria of Plastic Concrete under True Triaxial Compressive Stress. *Materials*. 2021;14(1):102. <https://doi.org/10.3390/ma14010102>