


DOI 10.22363/1815-5235-2022-18-6-503-514
УДК 691.32

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Свойства высокопрочного сталефибробетона с минимальным эффективным содержанием фибры при нагружениях различной длительности

Н.И. Карпенко , Г.А. Моисеенко  

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Москва, Российская Федерация

 gecklock@yandex.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 1 сентября 2022 г.
Доработана: 20 ноября 2022 г.
Принята к публикации: 27 ноября 2022 г.

Для цитирования

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>


Аннотация. Проводится обзор результатов комплексных теоретических исследований физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона в сравнении с неармированным мелкозернистым высокопрочным бетоном из самоуплотняющихся смесей при кратковременном и длительном воздействии нагрузки. На основании данных обширных экспериментальных исследований подобраны и разработаны методики математического описания свойств бетона в зависимости от ключевых факторов влияния. Исследован сталефибробетон с минимальным содержанием выбранного типа фибры, при котором начинает проявляться положительное влияние фибрового армирования. Получил развитие теоретический подход В.М. Бондаренко к описанию мер ползучести сталефибробетона. Представленные методики могут использоваться для расчета конструкций из высокопрочного сталефибробетона с применением современного диаграммного метода.

Ключевые слова: высокопрочный сталефибробетон, мелкозернистый высокопрочный бетон, фибра, диаграмма деформирования, ползучесть бетона, мера ползучести бетона

Investigation of the properties of high-strength steel fiber concrete with a minimum effective fiber content under loads of various durations

Nikolay I. Karpenko , Gennady A. Moiseenko  

Research Institute of Building Physics of the RAACS, Moscow, Russian Federation

 gecklock@yandex.ru

Article history

Received: September 1, 2022
Revised: November 20, 2022
Accepted: November 27, 2022

Abstract. The authors review the results of complex theoretical studies of the physico-mechanical and rheological properties of high-strength steel-fiber concrete in comparison with non-reinforced fine-grained high-strength concrete made of self-compacting mixtures under short-term and long-term load expo-

Карпенко Николай Иванович, академик-секретарь РААСН, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории «Проблемы прочности и качества в строительстве», Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Российская Федерация, Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; ORCID: 0000-0001-9307-7952, Scopus Author ID: 57201536233, ResearchID: A-7245-2016, eLIBRARY SPIN-код: 1725-1550; niisf_lab9@mail.ru

Моисеенко Георгий Александрович, ведущий инженер, лаборатория «Проблемы прочности и качества в строительстве», Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН, Российская Федерация, 127238, Москва, Локомотивный пр-д, д. 21; ORCID: 0000-0002-5080-116X, Scopus Author ID: 57205366968; gecklock@yandex.ru

Nikolay I. Karpenko, Academician Secretary of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Research Officer of the laboratory “Problems of Strength and Quality in Construction”, Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, 21 Lokomotivnyi Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ORCID: 0000-0001-9307-7952, Scopus Author ID: 57201536233, ResearchID: A-7245-2016, eLIBRARY SPIN-code: 1725-1550; niisf_lab9@mail.ru

Georgiy A. Moiseenko, leading engineer, Laboratory “Problems of Strength and Quality in Construction”, Research Institute of Building Physics of the RAACS, 21 Lokomotivnyi Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-5080-116X, Scopus Author ID: 57205366968; gecklock@yandex.ru

© Карпенко Н.И., Моисеенко Г.А., 2022

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



For citation

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>

sure. Based on the data of extensive experimental studies, methods of Mathematical description of concrete properties depending on the key factors of influence have been selected and developed. A steel fiber concrete with a minimum content of the selected type of fiber is studied, at which the positive effect of fiber reinforcement begins to manifest itself. The theoretical approach of V.M. Bondarenko to the description of creep measures of steel fiber concrete has been developed. The developed methods can be used to calculate structures made of high-strength steel-fiber concrete using the modern diagram method.

Keywords: high-strength steel fiber concrete, fine-grained high-strength concrete, fiber, deformation diagram, concrete creep, concrete creep measure

Введение

Применение мелкозернистых высокопрочных бетонов (МВБ) в строительстве открывает широкие перспективы при возведении сложных, уникальных объектов, в число которых входят монолитные сооружения, большепролетные мосты, оболочки. При этом негативное влияние основного недостатка мелкозернистого бетона – повышенной хрупкости – может быть существенно снижено путем введения в матрицу бетона стальной фибры в количестве 1–3 % по массе.

Зарубежные смеси для производства высокопрочного бетона обладают сравнительно высокой жесткостью. Для применения в монолитном строительстве в России под руководством С.С. Каприелова была разработана технология получения самоуплотняющихся смесей на основе комплексных модификаторов, отличающихся повышенной сегрегационной устойчивостью [1–3]. Применение этих смесей при введении в матрицу короткой стальной фибры длиной 13 мм позволяет существенно оптимизировать технологический процесс монолитного строительства. Процент содержания фибры оказывает ключевое влияние на стоимость получаемого сталефибробетона. На основании комплекса обширных экспериментальных исследований [4] было показано, что для выбранного типа фибры минимальный процент содержания фибры, при котором проявляются положительные свойства фибрового армирования, составляет 1,5 % по массе (120 кг/м³).

Для полноценного применения получаемого высокопрочного сталефибробетона (ВСФБ) в строительстве необходимо разработать и обосновать методики теоретического описания его свойств, как при кратковременном, так и при длительном нагружении. Для внедрения в практику проектирования и расчета конструкций из сталефибробетона особенно актуальным является разработка экспериментально обоснованных методик определения свойств, совместимых с современным диаграммным методом расчета железобетонных конструкций. Данный метод построен на использовании реальных диаграмм деформирования материала под нагрузкой.

Целью проведенного теоретического исследования являлась разработка и обоснование математических зависимостей для описания физико-механических и реологических свойств исследуемых бетонов при нагружениях различной длительности, применимых для диаграммного метода расчета конструкций. В настоящей статье приведено обобщение основных результатов данного исследования.

Состав матрицы бетона для проведения экспериментальных исследований

Для проведения комплекса экспериментальных исследований [4] был использован следующий состав бетонной смеси: портландцемент марки ПЦ 500 ДОН – 900 кг/м³; суперпластификатор МБЗ-50К – 360 кг/м³; песок с $M_k = 2,5$ – 860 кг/м³; вода – 190 кг/м³.

Полученная смесь показала высокую подвижность и обладала сегрегационной устойчивостью. Для получения сталефибробетона в состав смеси вводилась латунированная фибра прямого профиля из высокоуглеродистой стали длиной 13 мм Ø0,3 мм.

Методика построения теоретических диаграмм деформирования МВБ и ВСФБ при кратковременном сжатии

Исследование диаграмм сжатия ε_b – σ_b высокопрочного сталефибробетона в сравнении с неармированной матрицей проводилось по двум сериям образцов – первая серия изготавливалась без фибры, а во вторую была введена стальная фибра в количестве 1,5 % по массе. Методика экспериментальных исследований, разработанная в [5] и подробно описанная в [6], позволяет получить диаграммы сжатия бетона до высоких уровней напряжения, близких к пределу прочности.

Аналитическое описание полученных диаграмм проводится на основании методики, описанной в [7]. Зависимость относительных продольных деформаций бетона от напряжений представляется в виде

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}, \quad (1)$$

где E_b – начальный модуль упругости бетона, принимаемый при уровне напряжений $\sigma = 0,25R_b$; ν_b – коэффициент изменения секущего модуля, вычисляемый по формуле

$$\nu_b = \hat{\nu}_b \pm (\nu_0 - \hat{\nu}_b) \sqrt{1 - \omega\eta - (1 - \omega)\eta^2}. \quad (2)$$

В формуле (2) для восходящей ветви диаграммы применяется знак плюс, а нисходящей – минус, η – уровень напряжений в бетоне:

$$\eta = \sigma_b / \hat{\sigma}_b; \quad (3)$$

σ_b – действующее напряжение в бетоне; $\hat{\sigma}_b$ – напряжение в вершине диаграммы сжатия, для нормативной диаграммы принимается $\hat{\sigma}_b = -R_{b,ser}$; $\hat{\nu}_b$ – коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы сжатия; ν_0 – начальный коэффициент изменения секущего модуля; ω – коэффициент, характеризующий кривизну диаграммы сжатия:

– для восходящей ветви диаграммы принимается

$$\nu_0 = 1,0; \quad \omega = 2 - 2,5 \hat{\nu}_b; \quad (4)$$

– для нисходящей ветви диаграммы принимается

$$\nu_0 = 2,05 \hat{\nu}_b; \quad \omega = 1,95 \hat{\nu}_b - 0,138. \quad (5)$$

Коэффициент изменения секущего модуля в вершине диаграммы сжатия вычисляется по зависимости

$$\hat{\nu}_b = \frac{\hat{\sigma}_b}{E_b \hat{\varepsilon}_b}, \quad (6)$$

где $\hat{\varepsilon}_b$ – относительная деформация бетона в вершине диаграммы сжатия:

$$\hat{\varepsilon}_b = -\frac{B}{E_b} \lambda \frac{k + \left(0,8 - 0,15 \frac{B^2}{10\,000}\right) \lambda B / 60 + 0,2 \lambda / B}{0,12 + 1,03 B / 60}, \quad (7)$$

где λ – безразмерный коэффициент, зависящий от вида бетона, принимаемый равным 1 для тяжелого и мелкозернистого бетона; B – условный класс бетона, принимается равным $1,4R_{b,ser}$; k – безразмерный коэффициент, для МВБ $k = 1$, для ВСФБ $k = 1,3$.

Величина $\hat{\varepsilon}_b$ может также вычисляться по зависимости

$$\hat{\varepsilon}_b = k 10^{-5} \left(\sqrt[4]{\frac{R_b}{R_0}} \right), \quad (8)$$

где k – безразмерный коэффициент, для МВБ $k = 200$, для ВСФБ $k = 220$; R_0 – размерный коэффициент, принимаемый равным 20 МПа.

Относительные поперечные деформации бетона определяются по зависимости

$$\varepsilon_p = -\varepsilon_b \mu_b, \tag{9}$$

где μ_b – коэффициент поперечных деформаций бетона:

$$\mu_b = \hat{\mu}_b + (\mu_b^0 - \hat{\mu}_b) \sqrt{1 - \eta^2}, \tag{10}$$

здесь μ_b – начальный коэффициент поперечных деформаций, принимаемый при уровне напряжений $\sigma = 0,25R_b$; $\hat{\mu}_b$ – значение коэффициента поперечных деформаций в вершине диаграммы сжатия:

$$\hat{\mu}_b = \mu_b^0 + (1 - 0,9^3 \sqrt{\hat{\nu}_b}). \tag{11}$$

Результаты сопоставления полученных по описанной методике теоретических диаграмм сжатия МВБ и ВСФБ с опытными данными представлены на рис. 1.

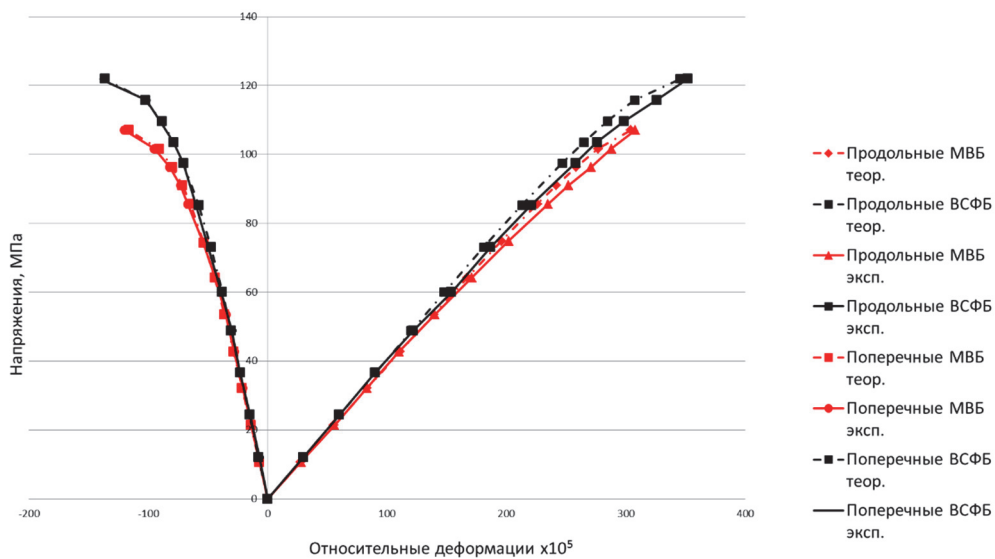


Рис. 1. Сравнение теоретических и экспериментальных диаграмм сжатия МВБ и ВСФБ

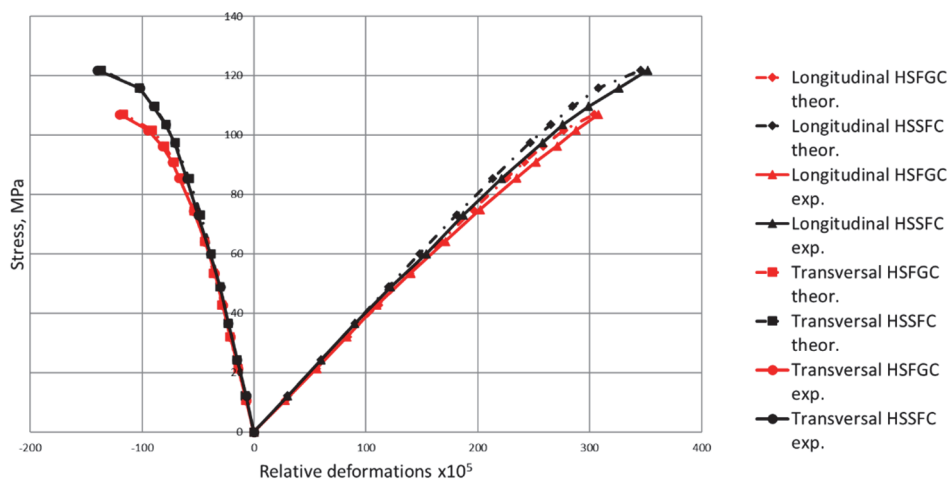


Figure 1. Comparison of theoretical and experimental compression diagrams of the fine-grained high-strength concrete (FGHSC) and high-strength steel fiber concrete (HSSFC)

Методика теоретического описания общих мер ползучести МВБ и ВСФБ с учетом возраста в момент нагружения

Реологические свойства высокопрочного сталефибробетона в сравнении с неармированной матрицей в части деформаций ползучести исследовались по двум сериям образцов-призм, в одну из которых вводилась стальная фибра в количестве 1,5 % по массе. Нагружение образцов длительным сжатием производилось в возрасте 7, 28 или 100 суток в соответствии с программой исследования. Варьировались также уровни прикладываемой нагрузки – $0,3R_b$ и $0,6R_b$, а для возраста нагружения 28 суток – и $0,8R_b$. Измерение деформаций ползучести производилось в течение 180 суток после нагружения, а затем исследовались деформации последствия в течение 60 суток. Методика экспериментальных исследований подробно описана в [4].

Для теоретического описания мер ползучести предлагались различные подходы. Экспериментальный подход к описанию мер простой ползучести был предложен И.Е. Прокоповичем и М.М. Заставой [8] и развит на случай нелинейной ползучести для исследуемых бетонов в [9]. В данной статье рассмотрим теоретический подход к описанию ползучести, предложенный В.М. Бондаренко и Н.И. Карпенко [10; 11]. В соответствии с этим подходом зависимость общей меры ползучести бетона от возраста нагружения t_0 , уровня прикладываемой нагрузки η и момента времени t представляется в виде:

$$C_0(\eta, t, t_0) = C_0(\eta, \infty, t_0) - \left[\frac{C_0(\eta, \infty, t_0) - C_0(\eta, t_0, t_0)}{\left[1 + \alpha \frac{m-1}{s+1} (\tilde{t}^{s+1} - 1)\right]^{\frac{1}{m-1}}} \right], \quad (12)$$

где $C_0(\eta, \infty, t_0)$ – предельная мера ползучести бетона возраста t_0 ; $C_0(\eta, t_0, t_0)$ – начальный вертикальный отрезок меры ползучести бетона; $\tilde{t} = \frac{t}{t_0}$ – относительное время нагружения; α, m, s – безразмерные эмпирические коэффициенты.

Для практического расчета в данной формуле возможно принятие значения $C_0(\eta, t_0 + 1, t_0)$ вместо $C_0(\eta, t_0, t_0)$, соответствующее длительности нагружения 1 сутки, при этом $\tilde{t} = \frac{t}{t_0+1}$.

Значения общих мер ползучести $C_0(\eta, t_0 + 1, t_0)$ определялись по опытным данным. Предельные меры ползучести $C_0(\eta, \infty, t_0)$ были определены на основании предельных деформаций ползучести $\epsilon^n(\infty, t_0)$, вычисленных по методике ГОСТ 24544–2020.

Для описания ползучести исследуемого МВБ и ВСФБ в соответствии с данной методикой был произведен подбор параметров s, α, m зависимости (13), обеспечивающий соответствие теоретических кривых опытным данным. Значения подобранных параметров в зависимости от возраста бетона в момент нагружения и уровня прикладываемой нагрузки приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Значения параметров общей меры ползучести для МВБ

Возраст нагружения, сут.	s			α			m		
	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b
7	3,3	3,9	–	3	0,5	–	9,46	14,5	–
28	4,8	6,4	6,5	0,9	1	1,4	8,4	9,5	10,5
100	10,9	7,9	–	4,7	4,6	–	7,4	5,6	–

Table 1

Values of the parameters of the overall creep measure for the FGHS

Loading age, days	s			α			m		
	0.3R _b	0.6R _b	0.8R _b	0.3R _b	0.6R _b	0.8R _b	0.3R _b	0.6R _b	0.8R _b
7	3.3	3.9	–	3	0.5	–	9.46	14.5	–
28	4.8	6.4	6.5	0.9	1	1.4	8.4	9.5	10.5
100	10.9	7.9	–	4.7	4.6	–	7.4	5.6	–

Таблица 2

Значения параметров общей меры ползучести для ВСФБ

Возраст нагрузки, сут.	s			α			m		
	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b
7	4,3	13	–	0,35	0,3	–	7,9	20	–
28	0,6	2,8	7,7	0,7	1,27	3,2	11	5,85	9,9
100	9	4	–	4	4	–	6,7	4	–

Table 2

Values of the parameters of the overall creep measure for the HSSFC

Loading age, days	s			α			m		
	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b	0,3R _b	0,6R _b	0,8R _b
7	4.3	13	–	0.35	0.3	–	7.9	20	–
28	0.6	2.8	7.7	0.7	1.27	3.2	11	5.85	9.9
100	9	4	–	4	4	–	6.7	4	–

Результаты построения теоретических кривых мер ползучести в сравнении с опытными данными для МВБ и ВСФБ в возрасте нагрузки 28 суток представлены на рис. 2, 3.

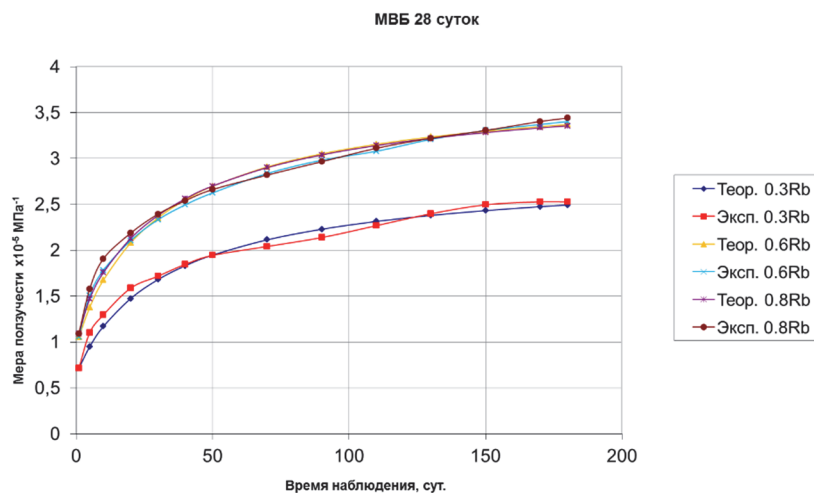


Рис. 2. Кривые мер ползучести для МВБ, загруженного в возрасте 28 суток

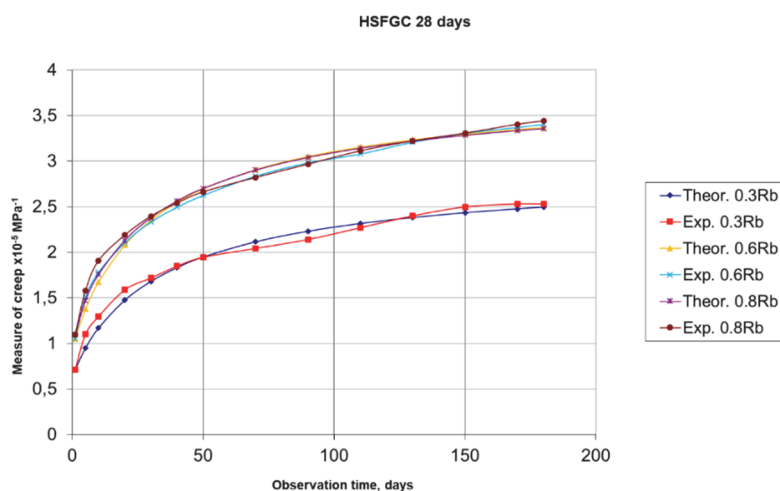


Figure 2. Curves of creep measures for the FGHSFC loaded at the age of 28 days

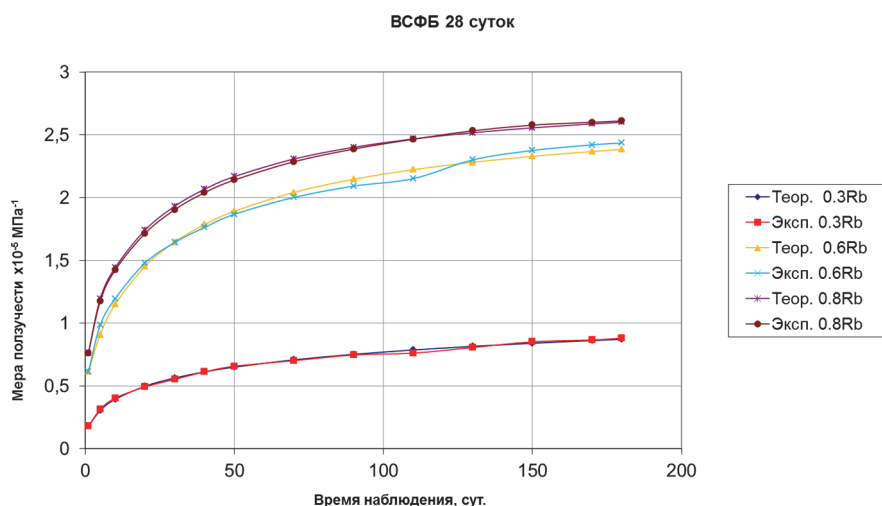


Рис. 3. Кривые мер ползучести для ВСФБ, загруженного в возрасте 28 суток

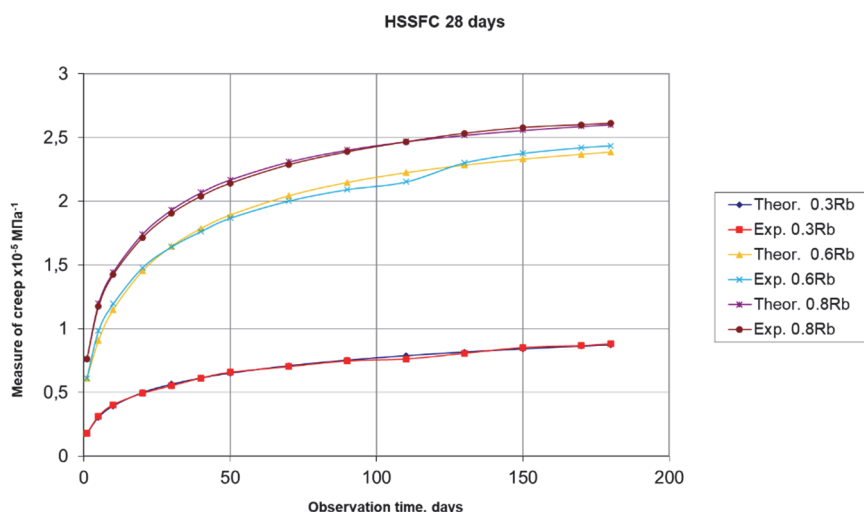


Figure 3. Curves of creep measures for HSSFC loaded at the age of 28 days

Методика построения диаграмм-изохрон МВБ и ВСФБ при жестком режиме нагружения

На процесс деформирования бетона в момент времени t существенно влияют два фактора – возраст загружаемого бетона t_0 и длительность действия нагрузки ($t-t_0$). Чем больше длительность действия нагрузки, тем значительнее проявляется влияние деформаций ползучести на общую картину деформирования. Если все точки диаграммы деформирования бетона $\varepsilon_b-\sigma_b$ получены при одном и том же времени нагружения ($t-t_0$), то такую диаграмму называют диаграммой-изохроной при заданном времени нагружения. Впервые идея построения диаграмм-изохрон появилась в работе П.И. Васильева [12]. Позднее диаграммы-изохроны рассматривались В.М. Бондаренко в [13]. Методика построения диаграмм-изохрон, позволяющая определять деформации в зависимости от уровня нагружения в любой момент времени, может быть использована при расчете конструкций в соответствии с диаграммным методом расчета. В связи с этим актуальным представляется разработка обоснованной методики теоретического построения диаграмм-изохрон для исследуемого ВСФБ.

В качестве эталонных режимов нагружения при построении диаграмм-изохрон рассматриваются две ситуации:

- жесткий режим нагружения предполагает приложение всей нагрузки в течение непродолжительного времени (до 1 часа) и ее сохранение на неизменном уровне в течение дальнейшего времени ($t-t_0$);
- мягкий режим нагружения предполагает линейное возрастание нагрузки от нуля до проектного значения на протяжении всего времени ($t-t_0$) со скоростью, близкой к постоянной.

Комплекс экспериментов, описанный в [4], позволяет исследовать жесткий режим нагружения МВБ и ВСФБ от 1 часа загрузки до 180 суток. На основании опытных данных была разработана методика построения диаграмм-изохрон для исследуемых бетонов, подробно описанная в [14]. Приведем основные зависимости данной методики.

Длительное нагружение бетона сжатием снижает его призмную прочность. Длительная прочность бетона при жестком режиме нагружения определяется по зависимости:

$$R_{b,ser}(t, t_0) = R_{b,ser}(t_0) \left\{ [0,95 - 1,57 \cdot 10^{-2} \ln(t - t_0)] \gamma_t + \frac{\bar{\gamma}_{b2}(1 - \gamma_t)}{1 - (1 - \bar{\gamma}_{b2})e^{-4\gamma_1(t - t_0)}} \right\}, \quad (13)$$

где $\gamma_t = 1$ для жесткого режима нагружения; γ_{b2} – коэффициент для учета влияния возраста бетона и условий твердения на длительное сопротивление; $R_{b,ser}(t_0)$ – начальный предел прочности при сжатии для данного возраста загрузки.

Практическое построение диаграмм-изохрон для момента времени t выполняется с использованием зависимости, аналогичной случаю кратковременного сжатия, но входящие в него величины определяются с учетом времени нагружения ($t - t_0$):

$$\varepsilon_b(t) = \frac{\sigma_b(t, t_0)}{E_b(t, t_0) \nu_b(t, t_0)}, \quad (14)$$

где $\sigma_b(t, t_0)$ – напряжение сжатия в момент времени ($t - t_0$), определяемое с учетом уровня нагружения по выражению $\sigma_b(t, t_0) = \eta(t, t_0) R_b(t, t_0)$, здесь

$$\eta(t, t_0) = \eta(t_0) \frac{R_b(t, t_0)}{R_b(t_0)}, \quad (15)$$

$E_b(t, t_0)$ – начальный модуль упругости в момент времени ($t - t_0$), для жесткого режима нагружения принимаемый как $E_b(t_0)$; $\nu_b(t, t_0)$ – коэффициент изменения секущего модуля с учетом длительности нагружения, вычисляется по зависимостям:

$$\nu_b(t, t_0) = \hat{\nu}_b(t, t_0) + [\nu_0(t, t_0) - \hat{\nu}_b(t, t_0)] \sqrt{1 - \omega \eta(t, t_0) - (1 - \omega) \eta^2(t, t_0)}, \quad (16)$$

$$\omega = 2 - 2,5 \hat{\nu}_b(t, t_0). \quad (17)$$

Граничные значения коэффициента изменения секущего модуля рекомендуется вычислять по зависимостям:

$$\nu_0(t, t_0) = \frac{1}{1 + \varphi_0(t, t_0)}; \quad (18)$$

$$\hat{\nu}_b(t, t_0) = \frac{\hat{\nu}_b}{1 + \hat{\nu}_b \hat{\varphi}(t, t_0)}, \quad (19)$$

где $\hat{\nu}_b$ – коэффициент изменения секущего модуля при краткосрочном сжатии, определяемый по формуле (6).

Величина $\varphi(t, t_0)$ называется характеристикой ползучести; величины $\varphi_0(t, t_0)$ и $\hat{\varphi}(t, t_0)$, входящие в (18), (19) – соответственно характеристики ползучести в начале и в вершине диаграммы-изохроны при сжатии. Приведем алгоритм расчета характеристики ползучести с учетом ее нелинейной зависимости от уровня нагружения.

Характеристика ползучести для жесткого режима нагружения исследуемых бетонов в момент времени ($t - t_0$) определяется выражением:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi f(t - t_0) \Delta(t, t_0), \quad (20)$$

здесь $\varphi = \varphi(\infty, t_0)$ – предельная характеристика ползучести; $f(t - t_0)$ – функция для учета нарастания во времени меры ползучести; $\Delta(t, t_0)$ – функция для учета влияния быстроснатекающей ползучести в начале загрузки.

Предельная характеристика ползучести с учетом нелинейности в формуле (20) вычисляется по выражению:

$$\varphi = \varphi^N \xi_1 \xi_2 \Omega(t_0) f_c, \quad (21)$$

где φ^N – предельная функция для бетонов, находящихся в эталонных условиях, зависит преимущественно от вида бетона; из сопоставления теоретических и опытных данных для МВБ $\varphi^N = 4,5$, для ВСФБ $\varphi^N = 3,6$; коэффициенты ξ_1 и ξ_2 учитывают влияние влажности среды и условия влагообмена со средой соответственно; $\Omega(t_0)$ – функция для учета влияния старения бетона на меру ползучести, определяемая выражением

$$\Omega(t_0) = 0,5 + d e^{-2\gamma_1 t_0}, \quad (22)$$

где параметры d и γ_1 назначаются в зависимости от модуля открытой поверхности конструкции; f_c – функция нелинейности ползучести в зависимости от уровня нагружения, определяется выражением:

$$f_c = 1 + v_c \left(\frac{R_b(t, t_0)}{R_b(t_0)} \right)^2 \eta^2(t, t_0), \quad (23)$$

где v_c – коэффициент учета зависимости функции нелинейности от возраста загрузки бетона, подбираемый с учетом вида бетона и возраста нагружения.

Функция для учета нарастания во времени меры ползучести в формуле (20) определяется как

$$f(t - t_0) = 1 - D e^{-\alpha(t-t_0)} - B e^{-\gamma_1(t-t_0)}, \quad (24)$$

где γ_1 назначается в зависимости от модуля открытой поверхности конструкции; для исследуемых бетонов параметры $B = 0,475$; $D = 0,525$; $\alpha = 0,1$.

Функция для учета влияния быстроснатекающей ползучести в начале загрузки в формуле (20) при $t - t_0 \leq 1$ сутки определяется следующим образом:

$$\Delta(t, t_0) = \sqrt{1 + 0,314 \ln(t - t_0)}, \quad (25)$$

при $t - t_0 > 1$ сут функция $\Delta(t, t_0) = 1$.

Таким образом, граничные значения характеристик ползучести $\varphi_0(t, t_0)$ и $\hat{\varphi}(t, t_0)$, входящие в выражения (18)–(19), вычисляются по приведенному выше алгоритму при $\eta(t, t_0) = 0$ и при $\eta(t, t_0) = 1$ соответственно.

Следует отметить, что разработанная в рамках данной методики форма записи характеристики ползучести (21) дает возможность вычисления общей меры ползучести с учетом ее нелинейной зависимости от уровня нагружения по выражению

$$C(t, t_0, \eta) = \frac{\varphi(t, t_0)}{E_b(t_0)}. \quad (26)$$

При этом предельная мера ползучести для бетона, загружаемого в эталонном возрасте 28 суток, с приемлемой точностью может вычисляться по выражению

$$C(\infty, 28) = \frac{\varphi^N \xi_1 \xi_2}{E_b(t_0)} f_c. \quad (27)$$

На рис. 4 и 5 представлено сопоставление теоретических и экспериментальных диаграмм-изохрон МВБ и ВСФБ, загруженного в возрасте 28 суток, при продолжительности нагружения 0,05 суток (1 час) и 180 суток.

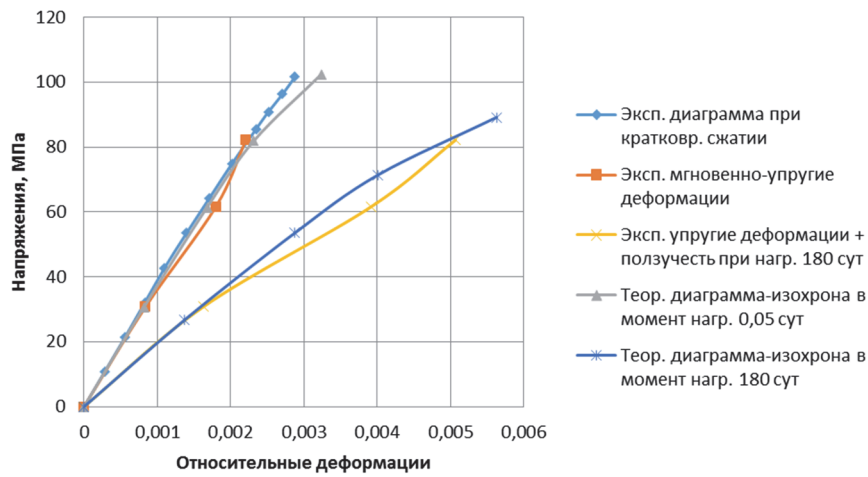


Рис. 4. Теоретические и экспериментальные диаграммы-изохроны для МВБ, загруженного в возрасте 28 суток

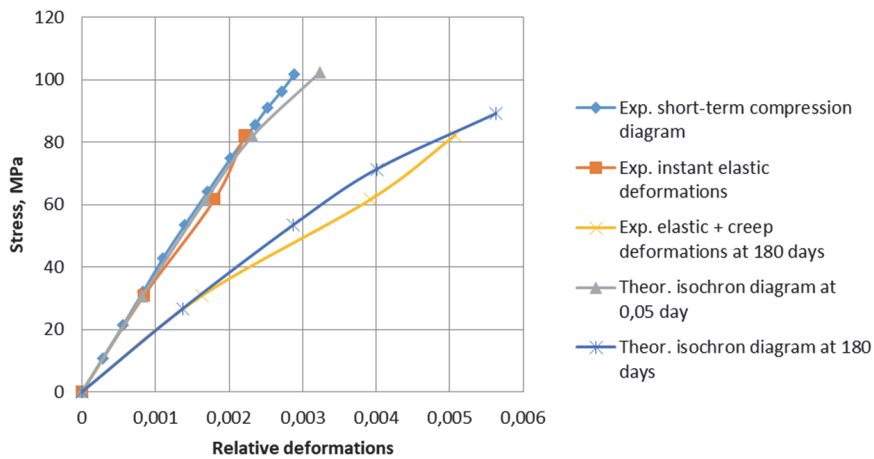


Figure 4. Theoretical and experimental isochron diagrams for the FGHSC loaded at the age of 28 days

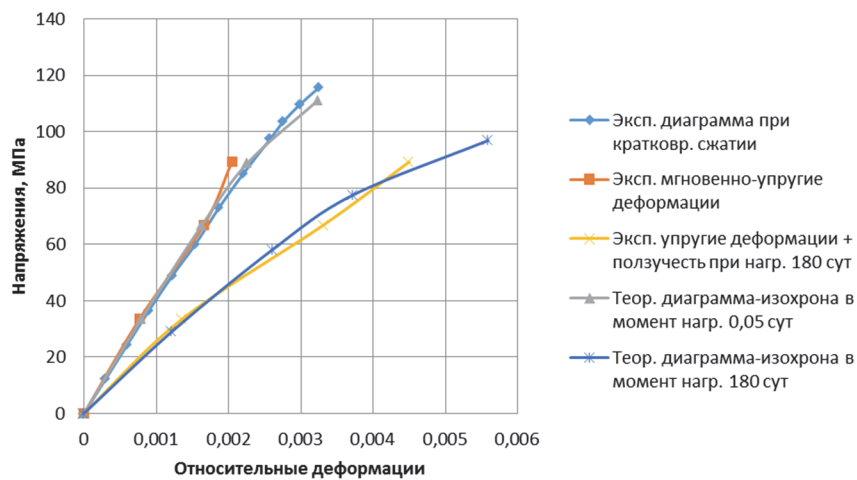


Рис. 5. Теоретические и экспериментальные диаграммы-изохроны для ВСФБ, загруженного в возрасте 28 суток

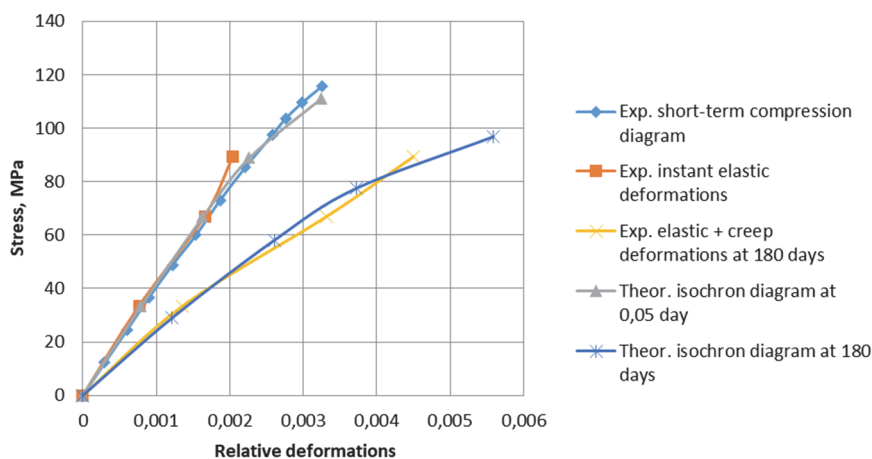


Figure 5. Theoretical and experimental isochron diagrams for the HSSFC loaded at the age of 28 days

Заклучение

Представлены основные результаты теоретических исследований физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона с минимальным эффективным содержанием выбранного типа фибры 1,5 % по массе в сравнении с неармированным мелкозернистым высокопрочным бетоном на основании комплекса опытных данных. В рамках данного исследования получены следующие основные результаты:

- откорректирована методика описания диаграмм продольного и поперечного деформирования исследуемых бетонов при кратковременном сжатии вплоть до высоких уровней напряжения в вершине диаграмм;

- проведено описание общих мер ползучести исследуемых бетонов в соответствии с теоретическим подходом В.М. Бондаренко и Н.И. Карпенко с подбором соответствующих параметров;

- на основании работ В.М. Бондаренко разработана методика построения диаграмм-изохрон исследуемых бетонов для любого момента времени с учетом нелинейной зависимости ползучести от уровня нагружения.

Представленные методики прошли проверку путем сопоставления с опытными данными и могут быть использованы при расчете конструкций из исследуемых бетонов в соответствии с диаграммным методом расчета.

Список литературы

1. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Дондуков В.Г. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками // Бетон и железобетон. № 2. 2006. С. 2–7.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны. М.: Типография «Парадиз», 2010. 258 с.
3. Каприелов С.С., Чилин И.А. Сверхвысокопрочный самоуплотняющийся фибробетон для монолитных конструкций // Строительные материалы. 2013. № 7. С. 28–30.
4. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Петров А.Н., Безгодков И.М., Моисеенко Г.А., Степанов М.В., Чилин И.А. Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочных сталефибробетонов из самоуплотняющихся смесей // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году: сборник научных трудов РААСН: в 2 т. Т. 2. М.: Изд-во АСВ, 2018. С. 237–246.
5. Безгодков И.М. К вопросу оценки предельной относительной деформации бетона при сжатии для разных классов бетона // Бетон и железобетон. 2015. № 5. С. 9–11.
6. 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>
7. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. С. 97.
8. Прокопович И.Е., Застава М.М. О расчетном определении предельных длительных деформаций тяжелого бетона // Бетон и железобетон. 1972. № 5. С. 35–37.

9. Степанов М.В., Моисеенко Г.А. Развитие экспериментального подхода к определению меры ползучести мелкозернистого высокопрочного бетона и сталефибробетона при рациональном содержании фибры // Строительство и реконструкция. 2018. № 3 (77). С. 98–104.
10. Бондаренко В.М., Ягунов Б.А. К вопросу о расчетной оценке ползучести бетона // Academia. Архитектура и строительство. 2006. № 3. С. 73–78.
11. Бондаренко В.М., Карпенко Н.И. Уровень напряженного состояния как фактор структурных изменений и реологического силового сопротивления бетона // Academia. Архитектура и строительство. 2007. № 4. С. 56–59.
12. Васильев П.И. Некоторые вопросы пластических деформаций бетона // Известия ВНИИГ. 1953. Т. 49. С. 83–113.
13. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона. Харьков: Изд-во Харьковского университета, 1968. 324 с.
14. 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>

References

1. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G. Modified high-strength fine-grained concrete with improved deformative characteristics. *Beton i Zhelezobeton*. 2006;(2):2–7. (In Russ.)
2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S. *New modified concretes*. Moscow: Tipografiya Paradiz Publ.; 2010. (In Russ.)
3. Kaprielov S.S., Silin I.A. Super high-strength self-sealing fibroconcrete for monolithic structures. *Stroitel'nye Materialy*. 2013;(7):28–30. (In Russ.)
4. Karpenko N., Kaprielov S., Petrov A., Bezgodov J., Moiseenko G., Stepanov M., Chilin I. Study of physical-mechanical and rheological properties of high-strength steel fiber concretes produced from self-compacting mixtures. *Fundamental, Exploratory and Applied Research of the RAASN on Scientific Support for the Development of Architecture, Urban Planning and the Construction Industry of the Russian Federation in 2017: Collection of Scientific Papers of the RAASN* (vol. 2). Moscow: ASV Publ.; 2018. p. 237–246. (In Russ.)
5. Bezgodov I.M. On the issue of estimating the ultimate relative deformation of concrete under compression for different classes of concrete. *Beton i Zhelezobeton*. 2015;(5):9–11. (In Russ.)
6. 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):11–21. (In Russ.) <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2019-83-3-11-21>
7. Karpenko N.I. *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1996. (In Russ.)
8. Prokopovich I.E., Zastava M.M. On the calculated determination of the maximum long-term deformations of heavy concrete. *Beton i Zhelezobeton*. 2012;(5):35–37. (In Russ.)
9. Stepanov M.V., Moiseenko G.A. Elaboration of the experimental approach to determination of measure of the creep of fine-grained high-strength concrete and high-strength steel fiber concrete with a rational fiber content. *Building and Reconstruction*. 2018;(3):98–104. (In Russ.)
10. Bondarenko V.M., Yagupov B.A. On the issue of the estimated creep of concrete 2006. *Academia. Architecture and Construction*. 2006;(3):73–78. (In Russ.)
11. Bondarenko V.M., Karpenko N.I. Stress state level as a factor of structural changes and rheological force resistance of concrete. *Academia. Architecture and Construction*. 2007;(4):56–59. (In Russ.)
12. Vasiliev P.I. Some issues of plastic deformations of concrete. *Izvestiya VNIIG*. 1953;49:83–113.
13. Bondarenko V.M. *Some questions of the nonlinear theory of reinforced concrete*. Kharkiv: Kharkiv University Press; 1968. (In Russ.)
14. 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>