



Сравнительная предельная растяжимость бетона и фибробетона

Т.Ф. Шляхтина^{1✉}, А.М. Курицына²^{1,2}Братский государственный университет, г. Братск, Россия

Аннотация. Цель исследования – сравнительная оценка предельных растягивающих напряжений по критерию трещиностойкости бетона и фибробетона на основе теоретических и экспериментальных данных. Устойчивость бетона к разрушению определяется способностью сопротивляться образованию и росту трещин. Если деформации для бетона по критерию трещиностойкости лимитируются предельной растяжимостью бетонной матрицы, незначительной для тяжелого бетона, то введение дисперсной арматуры способно существенно повысить предел прочности на растяжение и трещиностойкость. Рекомендуются методы расчета на трещиностойкость фибробетонных конструкций базируются на методах, применяемых для расчета трещиностойкости конструкций, армированных стержневой арматурой, и не в полной мере учитывают особенности фибробетона как конструкционного материала. Также общепринятые методы расчета фибробетонных конструкций не допускают образования трещин, хотя даже образование трещин со значительным раскрытием не приводит к потере несущей способности фибробетонных конструкций. В статье рассмотрены разные варианты расчета максимальных растягивающих напряжений в бетоне и фибробетоне для обеспечения трещиностойкости на основе справочно-нормативных и экспериментальных данных. Установлено, что дисперсное армирование металлическими фибрами как минимум вдвое повышает предельную растяжимость по критерию трещиностойкости, и даже низко модульные волокна эффективно повышают трещиностойкость, что позволит обеспечить более надежную работу конструкций, в том числе при зимнем бетонировании.

Ключевые слова: дисперсно-армированные бетоны, предельные растягивающие напряжения, трещиностойкость, предельная растяжимость, прочность на растяжение при раскалывании, зимнее бетонирование

Для цитирования: Шляхтина Т.Ф., Курицына А.М. Сравнительная предельная растяжимость бетона и фибробетона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2023. Т. 13. № 4. С. 716–725. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-716-725>. EDN: ZHKRFE.

Original article

Comparative ultimate tensile strength of concrete and fibre concrete

Tatiana F. Shlyahatina^{1✉}, Anna M. Kuricyna²^{1,2}Bratsk State University, Bratsk, Russia

Abstract. The study is aimed at comparing the ultimate tensile stresses with respect to the crack resistance criteria of concrete and fibre concrete based on theoretical and experimental data. The resistance of concrete to cracking is determined by the ability to resist the formation and growth of cracks. According to the cracking resistance criterion, concrete deformations are limited by the ultimate tensile strength of the concrete matrix, insignificant for heavy concrete, and the introduction of dispersed reinforcement can significantly increase its tensile strength and crack resistance. Recommended methods for calculating the crack resistance of fibre concrete structures are based on the procedures, used to calculate the crack resistance of structures, reinforced with bars, and incompletely account the features of a fibre concrete as a structural material. In addition, although even a significant crack opening cause no effect on the bearing capacity of fibre concrete structures, generally accepted methods for calculating fibre concrete structures exclude cracking. The article discusses various options for calculating the ultimate tensile stresses of concrete and fibre concrete for ensuring crack resistance based on refer-

ence normative and experimental data. Dispersed reinforcement with metal fibres was established at least doubling the ultimate tensile strength according to the crack resistance criterion with even low-modulus fibres effectively improving the crack resistance, which ensures a more reliable operation of structures, including during winter concreting.

Keywords: dispersed reinforced concrete, ultimate tensile stresses, crack resistance, ultimate extensibility, tensile strength during splitting, winter concreting

For citation: Shlyahatina T.F., Kuritsyna A.M. Comparative ultimate tensile strength of concrete and fibre concrete. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2023;13(4):716-725. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2023-4-716-725>. EDN: ZHKRFE.

ВВЕДЕНИЕ

Дисперсное армирование значительно повышает прочность на растяжение и трещиностойкость по сравнению с традиционным армированием бетона. Допустимо предположить, что, кроме преимущества на растяжение, фибробетон сможет воспринимать большие температурные градиенты, возникающие при выдерживании и тепловой обработке конструкций, особенно в зимних условиях. Под воздействием отрицательной температуры разрушение бетона может происходить вследствие одного или нескольких факторов [1, 2]:

- замерзающая в порах и капиллярах цементного камня вода за счет увеличения в объеме создает растущее гидростатическое давление;
- давление растущих кристаллов льда на стенки пор и капилляров;
- в процессе прогрева и охлаждения (замораживания и оттаивания) бетона за счет массотеплопереноса в капиллярах и порах цементного камня нарастает осмотическое давление;
- напряжения, возникающие в бетоне из-за различных коэффициентов температурных деформаций составляющих бетона и льда.

Указанные факторы вызывают растягивающие напряжения в твердеющем бетоне и могут быть восприняты именно дисперсной арматурой, равномерно распределенной в бетонной матрице. Температурные градиенты, возникающие в процессе твердения бетона, по критерию трещиностойкости лимитируются предельной растяжимостью бетонной матрицы, весьма незначительной для тяжелого бетона, а введение дисперсной арматуры способно существенно повысить предел прочности на растяжение и трещиностойкость [3–8].

Применяемые для дисперсного армирования волокна делят на высокомодульные и низкоимодульные по отношению к модулю упругости бетона, который в зависимости от класса бетона составляет от 19 до $40 \cdot 10^3$ МПа. Применение высокоимодульных волокон способствует увеличению прочности бетона при растяжении, жесткости и сопротивлении динамическим воздействиям. Использование низкоимодульных волокон приводит к уменьшению усадочных деформаций, повышает морозостойкость, сопротивление динамическим нагрузкам, усталости и истиранию¹ [9].

Многочисленные исследования установили, что эффективность дисперсно-армированных бетонов в значительной степени определяется параметрами армирования, включая степень насыщения матрицы волокнами (μ), диаметр и длину фибр (d, l) с учетом ориентации и анкеровки. Рабочий диапазон объемного содержания фибр в фибробетонных конструкциях изменяют, как правило, в пределах 1–1,5%. С повышением процента армирования увеличивается трудоемкость изготовления конструкции, но при этом должного повышения прочностных показателей не происходит, а меньшее объемное содержание волокон не обеспечивает полного раскрытия возможностей дисперсного армирования.

Устойчивость бетона к разрушению определяется способностью сопротивляться образованию и росту трещин. В тяжелом бетоне появившееся трещины не встречают на своем пути препятствий, что позволяет им распространяться в теле бетона. В дисперсно-армированных бетонах волокна препятствуют распространению и раскрытию трещин. Под воздействием напряжений в конструкции первая трещина, образовавшаяся в фибробетоне, не приводит к катастрофическому разрушению, но способствует перераспреде-

¹Телешев В.И. Конструктивно-технологические решения по обеспечению трещиностойкости и монолитности массивных бетонных сооружений: учеб. пособие. ЛПИ, 1983. 90 с.

нию нагрузки между бетонной матрицей и волокнами. Таким образом, нагрузка, действующая на зону возникновения трещин, перераспределяется на волокна, и края трещин освобождаются от напряжений, что может привести к затуханию трещины. Это явление возможно за счет силы сцепления фибры с бетонной матрицей и механизмов заанкеривания волокон в бетоне [10–21].

При достижении предела растрескивания матрица разделяется бесчисленными параллельными трещинами, а воздействие дополнительного растягивающего напряжения приводит к растяжению волокон. С точки зрения механики разрушения работу дисперсно-армированных композитов можно представить в виде трех этапов:

- упругий диапазон до точки возникновения первой трещины;
- этап множественного растрескивания, когда деформации композита превышают максимально возможные деформации матрицы;
- далее в зависимости от модуля и прочности сцепления начинается этап растягивания или выдергивания волокон из матрицы.

Анализ методов расчета на трещиностойкость фибробетонных конструкций показал, что базируются они на методах, применяемых для расчета трещиностойкости конструкций, армированных стержневой арматурой¹ и при этом не учитывают особенностей фибробетона как конструкционного материала.

Рекомендованные методы расчета фибробетонных конструкций не допускают образования трещин в фибробетоне, хотя образование даже трещин со значительным раскрытием не приводит к разрушению конструкции.

Такая работа фибробетона позволяет использовать при расчетах линейную механику разрушения как для квазиоднородного материала.

Далее предполагается оценить предельную растяжимость и трещиностойкость бетонов и фибробетонов на основе справочно-нормативных и экспериментальных данных.

МЕТОДЫ

В научных работах отечественных и зарубежных авторов проблема трещиностойкости бетона рассматривается с разной степенью упрощений и эмпирических зависимостей. Если для железобетона расчет по второй группе предельных состояний на образование трещин осложняется наличием, кроме упругих, еще пластических деформаций бетона, то для фибробетона теоретические подходы только разрабатываются и требуют уточнения и совершенствования.

Российские и зарубежные исследователи предложили ряд критериев температурного трещинообразования на основе сравнения возникающих в возводимой конструкции растягивающих напряжений с допустимыми значениями. При этом возможен учет ряда граничных условий.

В практике проектирования и возведения бетонных сооружений используется критерий термической трещиностойкости, основанный на теории прочности бетона. Обычно критерий термической трещиностойкости является безразмерной величиной, которую физически можно трактовать как наибольшее возможное относительное удлинение бетона, наблюдаемое в результате тепловыделения. Во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева установлен критерий трещиностойкости массивного бетона, учитывающий пластические деформации в значении предельной растяжимости [6]:

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{пр} \cdot E}{k}, \quad (1)$$

где σ – максимальное растягивающее напряжение в бетонном массиве; E – модуль упругости бетона, принят $E = 30 \cdot 10^3$ МПа.

Модуль упругости для фибробетона определяется по формуле

$$E_{fb} = E + (E_f - E) \cdot \mu_f, \quad (2)$$

где E_f – модуль упругости фибры (для стальной $E_f = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, а для полимерной – $0,35 \cdot 10^5$ МПа); μ_f – коэффициент объемного армирования фиброй, принимаемый $\mu_f = 0,01$; k – коэффициент запаса $k = 1,2$ [6].

Расчет максимального растягивающего напряжения для оценки термической трещиностойкости бетонного массива П.И. Васильев предложил производить по формуле [10]:

$$\sigma = \gamma_{b3} \cdot \gamma_{b6} \cdot \varepsilon_{пр} \cdot \varphi \cdot E, \quad (3)$$

где σ – максимальное растягивающее температурное напряжение в бетонном массиве; γ_{b3} – коэффициент условий работы для массивных сооружений (принимается, равным 1,15 для массивных сооружений и равным 1 – для остальных); γ_{b6} – коэффициент условий работы бетонных конструкций, учитывающий влияние на прочность растянутого бетона градиента деформаций по сечению, принят на основании предварительных расчетов – $\gamma_{b6} = 1,1$; $\varepsilon_{пр}$ – предельная растяжимость бетона и фибробетона; φ – коэффициент, учитывающий зависимость предельной растяжимости от возраста бетона, принято значение $\varphi(\tau) = 0,77$ бетона в возрасте 14 сут, исходя из традиционных сроков выдерживания конструкций в построечных условиях.

В зарубежной практике возведения мас-

сивных бетонных сооружений также используются аналогичные критерии оценки возможного температурного трещинообразования. Так, в СП 52-104-2006 «Сталефибробетонные конструкции»² для приближенной оценки возможности трещинообразования предлагается использовать выражение, аналогичное выражению (2), но записанное с использованием не предельной растяжимости бетона, а предельно допустимого температурного перепада ΔT .

Для предотвращения температурного трещинообразования величина температурных растягивающих напряжений σ не должна превосходить допустимую величину:

$$\sigma = k_3 \cdot k_p \cdot E \cdot \alpha \cdot \Delta T, \quad (4)$$

где k_3 – коэффициент заземления, принят $k_3 = 0,0007$; k_p – коэффициент релаксации, принят $k_p = 340$; α – коэффициент линейного температурного расширения бетона и фибробетона; ΔT – предельно допустимый темпе-

ратурный перепад в бетонном массиве, принят 20°C согласно Руководству⁴, а для фибробетона ориентировочно – 30°C .

Коэффициент линейного температурного расширения для фибробетона определяется по формуле

$$a_{fbt} = a_{bt} \cdot (1 - \mu_f) + a_{ft} \cdot \mu_f, \quad (5)$$

где a_{fbt} – коэффициент температурного расширения бетона ($13 \cdot 10^{-6}$); a_{ft} – коэффициент линейной температурной деформации стали, принят равным $12 \cdot 10^{-6}$, а для полипропилена – $11 \cdot 10^{-5}$.

Для сравнения теоретически рассчитанных и экспериментальных значений предельной растяжимости фибробетонов в сопоставлении с неармированным мелкозернистым бетоном в лаборатории «Технологии бетона» кафедры СМиТ БрГУ были изготовлены образцы балочки с размерами $7 \times 7 \times 23$ см. Составы бетонов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Расход материалов на 1 м^3 бетона
Table 1. Material consumption per 1 м^3 of concrete

№ серии	Вид волокон и % армирования по массе	Состав матрицы Ц:П	Расход материалов на 1 м^3 , кг			
			цемент	песок	вода	фибры
1	Без волокон	1:2	660,3	1320,6	264,1	–
2	Без волокон	1:3	489,3	1467,8	229,9	–
3	Металлическая фибра, 5%	1:2	687,4	1374,5	274,9	103,1
4	Полипропиленовое волокно, 1%	1:3	474,8	1424,5	213,6	19,0

После формования на виброплощадке образцы хранились в нормальных условиях и испытывались в возрасте 28 сут на растяжение при раскалывании и сжатие на гидравлическом пресс ПСУ-10 (дата последней поверки: 21.10.2022 г.). При расчете максимальных растягивающих напряжений для бетона, предельную растяжимость определяли по формуле [4]

$$\varepsilon_{пр} = \frac{2R_{tt}}{E_b}, \quad (6)$$

где R_{tt} – прочность бетона на растяжение при раскалывании; E_b – модуль упругости бетона. Тогда максимальное растягивающее напряжение в бетоне σ можно рассчитать по формуле³

$$\sigma = \frac{\varepsilon_{пр} E_b}{k}, \quad (7)$$

где k – коэффициент запаса $k = 1,2^5$.

На основе приведенных формул и экспериментально полученных значений предельной растяжимости были рассчитаны максимальные растягивающие напряжения на основе нормативно-справочных и экспериментальных данных для бетонов и фибробетонов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов величины растягивающих напряжений до образования трещин для бетона-матрицы и фибробетона со стальными и полипропиленовыми волокнами с использованием нормативно-справочных данных по приведенным выше формулами сведены в табл. 2.

Выполненные по различным методикам расчеты показывают хорошую сходимость результатов, а также значимое увеличение предельной растяжимости при введении даже

¹СП 52-104-2006 Сталефибробетонные конструкции. М.: Минрегион России, 2006. 67 с.

²СП 360.1325800.2017 Конструкции сталефибробетонные. М.: Минрегион России, 2017. 75 с.

³Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса. М.: Стройиздат. 1975. 192 с.

⁴СП 41.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. М.: Минрегион России, 2012. 148 с.

полимерных волокон, хотя общепризнано, что низко модульные волокна существенного увеличения прочностных характеристик не обеспечивают, но способны сдерживать деформации матрицы.

Физико-механические характеристики экспериментально изготовленных образцов для бетонов и фибробетонов приведены табл. 3.

Экспериментально полученная прочность на растяжение при раскалывании для стале-

фибробетона выше на 75%, а для фибробетона с полимерной фиброй – на 35%, чем для аналогичной мелкозернистой матрицы.

Пластический характер разрушения фибробетонных образцов представлен на рисунке, что подтверждает особый характер работы дисперсной арматуры, сдерживающей трещинообразование и обеспечивающей работоспособность конструкций даже после образования трещин.

Таблица 2. Предельная величина растягивающих напряжений мелкозернистого бетона-матрицы и фибробетонов, МПа

Table 2. Limit value of tensile stresses of fine-grained concrete-matrix and fiber concrete, MPa

Методика расчета	Формулы	Бетон-матрица, Ц:П = 1:2	Стале-фибробетон	Бетон-матрица, Ц:П=1:3	Фибробетон с полимерной фиброй
Методика ВНИИГ	$\sigma = \frac{\varepsilon_{пр} \cdot E}{k}$	1,6	3,05	1,52	2,17
Методика П.И. Васильева	$\sigma = \gamma_{b3} \cdot \gamma_{b6} \cdot \varepsilon_{пр} \cdot \varphi \cdot E$	1,7	3,39	1,61	2,43
Методика СП 41.13330.2012	$\sigma = k_3 \cdot k_p \cdot E \cdot a \cdot \Delta T$	2,11	3,66	1,99	2,61

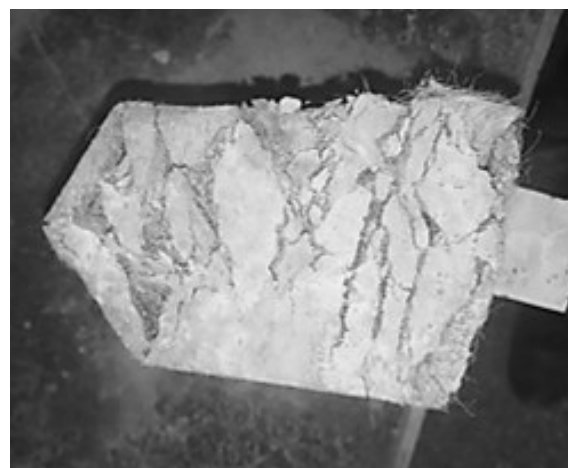
Таблица 3. Экспериментальные физико-механические характеристики бетонов и фибробетонов

Table 3. Experimental physical and mechanical characteristics of concrete and fiber concrete

Состав матрицы	Вид фибры и % армирования по массе	Средняя плотность бетона, кг/м ³	Прочность на растяжение при раскалывании, R _{tt} , МПа	
			Прочность отдельных образцов, R _{tt}	Средняя прочность в серии R _{tt}
1:2	–	2245	2,0	2,18
			2,25	
			2,28	
1:3	–	2187	1,30	1,41
			1,48	
			1,44	
1:2	Стальная фибра, 5 %	2371	3,65	3,8
			4,28	
			3,62	
			3,57	
			3,71	
			3,96	
1:3	Полипропиленовая фибра, 1 %	2113	1,88	1,9
			1,87	
			1,75	
			2,22	
			1,810	
			1,85	



a



b

Пластический характер разрушения фибробетонных образцов:

***a* – сталефибробетонный; *b* – фибробетонный**

Plastic nature of destruction of fiber-concrete samples:

***a* – steel fiber-reinforced concrete; *b* – fiber-reinforced concrete**

На основе справочно-нормативных и экспериментально полученных данных были рассчитаны максимально допустимые растягивающие напряжения по критерию трещиностойкости для бетона-матрицы, сталефибробетона и фибробетона с полимерной фиброй. Результаты расчетов представлены в табл. 4 и 5 соответственно.

Если для мелкозернистой матрицы расчеты с использованием справочно-нормативных и экспериментальных данных дают достаточно близкие результаты, свидетельствуя о хорошей сходимости теоретических подходов с реальной работой бетона, то для сталефибробетона расхождения весьма значитель-

ны. Удвоение предельной величины растягивающих напряжений для сталефибробетона при использовании в расчетах экспериментально полученных значений предельной растяжимости свидетельствует о необходимости более полного учета особенностей работы дисперсно-армированных бетонов. Полипропиленовая фибра относится к низкомолекулярным волокнам, и не должна оказывать влияния на прочностные характеристики бетона, хотя данные табл. 5 свидетельствуют о значительном повышении предельных растягивающих напряжений для фибробетона с полимерной фиброй, подтверждая особый характер работы дисперсно-армированных бетонов.

Таблица 4. Предельная величина растягивающих напряжений бетона-матрицы и сталефибробетона, МПа

Table 4. Limit value of tensile stresses of concrete matrix and steel fiber concrete, MPa

Наименование методики	Бетон-матрица, Ц:П=1:2		Сталефибробетон	
	Расчет с использованием справочно-нормативных данных	Расчет с использованием экспериментальных данных	Расчет с использованием справочно-нормативных данных	Расчет с использованием экспериментальных данных
Методика ВНИИГ	1,6	1,75	2,65	6,33
Методика П.И. Васильева	1,7	1,78	2,69	11,63
Методика СП 41.13330.2012	2,11	2,48	2,95	7,36

Таблица 5. Предельная величина растягивающих напряжений бетона-матрицы и фибробетона с полимерной фиброй, МПа
Table 5. Limit value of tensile stresses of concrete matrix and fiber concrete with polymer fiber, MPa

Методика	Бетон-матрица, Ц:П=1:3		Фибробетон	
	Расчет с использованием		Расчет с использованием	
	справочно-нормативных данных	экспериментальных данных	справочно-нормативных данных	экспериментальных данных
Методика ВНИИГ	1,52	2,35	2,65	3,17
Методика П.И. Васильева	1,61	4,32	2,69	5,81
Методика СП 41.13330.2012	1,99	2,0	2,95	3,58

Величины предельных растягивающих напряжений, полученные в расчетах с использованием справочно-нормативных и экспериментальных данных (см. табл. 4 и 5), для фибробетонов больше соответствуют неармированной матрице, доказывая еще раз, что стандартные расчеты не учитывают особенностей пластического деформирования дисперсно-армированных бетонов и сохранения несущей способности после образования трещин.

Заниженные значения предельно допустимых растягивающих напряжений для фибробетонов, полученные в результате стандартных расчетов, не в полной мере учитывают возможности дисперсного армирования и приводят к перерасходу ресурсов.

Использование дисперсной арматуры при зимнем бетонировании позволит снизить энергозатраты на обогрев или утепление конструкций за счет увеличения растягивающих напряжений до образования трещин и сохранения несущей способности даже после трещинообразования, характерных для фибробетонов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Значительные температурные градиенты, возникающие при зимнем бетонировании, могут приводить к трещинообразованию, для предотвращения которого применяют экономически затратные мероприятия, включая утепление опалубки и дополнительный обогрев боковых поверхностей бетонируемых конструкций.

2. Дисперсное армирование, особенно высокомодульными волокнами, обеспечивает

существенное повышение трещиностойкости, позволяя рекомендовать фибробетоны для зимнего бетонирования.

3. Существующие методы расчета фибробетонов по второй группе предельных состояний предусматривают приведение дисперсной арматуры к стержневой, что способствует занижению реальных прочностных характеристик фибробетонов.

4. Выполненные по различным методикам расчеты величины предельных растягивающих напряжений показывают хорошую сходимость результатов, а также значимое увеличение предельной растяжимости при введении даже полимерных волокон.

5. Экспериментально полученная прочность на растяжение при раскалывании для сталефибробетона выше на 75%, а для фибробетона с полимерной фиброй – на 35%, чем для аналогичной мелкозернистой матрицы, что подтверждает особый характер работы фибробетонов.

6. Заниженные значения предельно допустимых растягивающих напряжений для фибробетонов, полученные в результате стандартных расчетов, не в полной мере учитывают возможности дисперсного армирования и приводят к перерасходу ресурсов.

7. Использование дисперсной арматуры при зимнем бетонировании позволит снизить энергозатраты на обогрев или утепление конструкций за счет увеличения растягивающих напряжений до образования трещин и сохранения несущей способности даже после трещинообразования, характерных для фибробетонов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Колчеданцев Л.М., Васин А.П., Осипенкова И.Г., Ступакова О.Г. Технологические основы монолитного бетона. Зимнее бетонирование: Монография / Под ред. Л.М. Колчеданцева. СПб.: Лань, 2016. 282 с.
2. Батяновский Э.И., Голубев Н.М., Бабицкий В.В., Марковский М.Ф. Технология и методы зимнего монолитного и приобъектного бетонирования. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009. 232 с.
3. Трапезников Л.П. Температурная трещиностойкость массивных бетонных сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986. 272 с.
4. Карпенко Н.И. Общие модели механики железобетона. М.: Стройиздат, 1996. 416 с.
5. Холмянский М.М. Бетон и железобетон: Деформативность и прочность. М.: Стройиздат, 1997. 576 с.
6. Телешев В.И., Ватин Н.И., Марчук А.Н., Комаринский М.В. Производство гидротехнических работ. М., 2012. Т. 1. 485 с.
7. Иваненко А.Н., Иваненко Н.А., Пересыпкин Е.Н. Трещиностойкость железобетонных конструкций как функция предельной растяжимости бетона // Инженерный вестник Дона. 2014. № 3 (30). С. 80. EDN: TFXFYU.
8. Bamforth P.B. Early-age thermal crack control in concrete. London: CIRIA, 2007. 268 p.
9. Васильев П.И., Кононов Ю.И., Чирков Я.Н. Железобетонные конструкции гидротехнических сооружений. Киев: Высшая школа, 1982. 320 с.
10. Shlyakhtina T.F., Ivankova E.A., Popov N.A. Winter concrete: problems and solutions // Spatial Restructuring of territories: International Baikal investment and construction forum. IOP conference series: earth and environmental science (Irkutsk, 4 December 2020). IOP Publishing Ltd, 2021. Vol. 751. P. 012081.
11. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2004. 560 с.
12. Рабинович Ф.Н., Романов В.П. О пределе трещиностойкости мелкозернистого бетона, армированного стальными фибрами // Механика композитных материалов. 1985. № 2. С. 277–283.
13. Рабинович Ф.Н. Об оптимальном армировании сталефибробетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1986. № 3. С. 17–19.
14. Магдеев У.Х., Морозов В.И., Пухаренко Ю.В. Трещинообразование дисперсно-армированных бетонов с позиций механики разрушения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. № 1 (19). С. 110–117. EDN: PASJVV.
15. Шляхтина Т.Ф., Попов Н.А. Повышение эффективности зимнего бетонирования за счет дисперсного армирования // Тр. Братского государственного университета. Серия: Естественные и инженерные науки. 2022. Т. 1. С. 128–134. EDN: PVBVLV.
16. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukhareno Yu.V., Klyuev A.V. Fiber concrete on the basis of composite binder and technogenic raw materials // Materials science forum. 2018. Vol. 931. P. 603–607. (In Russ.). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.603>. EDN: DHNQPT.
17. Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Таскин А.В., Тимохин Р.А., Ключев С.В., Сезар К. Повышение ударной вязкости фиброзобетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 6. С. 5–16. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-6-5-16>. EDN: YTZIUC.
18. Пухаренко Ю.В., Жаворонков М.И., Пантелеев Д.А. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 301–310. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.3.301-310>. EDN: VOUYOL.
19. Колчунов В.И., Кузнецова К.К., Федоров С.С. Модель критерия трещиностойкости и прочности плоскенапряженных конструкций из высокопрочного фибробетона и фиброжелезобетона // Строительство и реконструкция. 2021. Вып. 3 (95). С. 15–26. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26>. EDN: KUEOPV.
20. Жеребцов Ю.В., Ельшаева Д.М., Лухнёва Ю.Н., Доценко Н.А., Самофалова М.С., Курасанов П.Р., и др. Влияние рецептурных факторов на прочностные свойства тяжелых сталефибробетонов // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2021. Т. 11. № 2. С. 250–259. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-250-259>. EDN: VBAPLY.
21. Парфенов А.А., Сивакова О.А., Гусарь О.А., Балакирева В.В. Работа и разрушение бетона в условиях высокой и низкой температуры // Строительные материалы. 2019. № 3. С. 64–67. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66>. EDN: ZIKFHV.

REFERENCES

1. Kolchedantsev L.M., Vasin A.P., Osipenkova I.G., Stupakova O.G. Technological foundations of monolithic concrete. Winter concreting. In: L. M. Kolchedantsev (Eds.). Saintt Petersburg: Lan; 2016. 282 p. (In Russ.).
2. Batyanovsky E.I., Golubev N.M., Babitsky V.V., Markovsky M.F. Technology and methods of winter monolithic and on-site concreting. Moscow: PH of the Association of Construction Universities; 2009. 232 p. (In Russ.).
3. Trapeznikov L.P. Temperature crack resistance of massive concrete structures. Moscow: Energoatomizdat; 1986. 272 p. (In Russ.).
4. Karpenko N.I. General models of reinforced concrete mechanics. Moscow: Stroyizdat; 1996. 416 p. (In Russ.).
5. Kholmyanskii M.M. Concrete and reinforced concrete: Deformability and strength. Moscow: Stroyizdat; 1997. 576 p. (In Russ.).
6. Teleshev V.I., Vatin N.I., Marchuk A.N., Komarinskii M.V. Production of hydraulic engineering works. Moscow; 2012. Vol.1. 485 p. (In Russ.).
7. Ivanenko A.N., Ivanenko N.A., PERESIPKIN E.N. The crack resistance of concrete structures as a function of the marginal elasticity of concrete. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering journal of Don*. 2014;3:80. (In Russ.). EDN: TFXFYN.
8. Bamforth P.B. Early-age thermal crack control in concrete. London: CIRIA; 2007. 268 p.
9. Vasiliev P.I., Kononov Yu.I., Chirkov Ya.N. Reinforced concrete structures of hydraulic engineering structures. Kiev: Higher School; 1982. 320 p. (In Russ.).
10. Shlyakhtina T.F., Ivankova E.A., Popov N.A. Winter concrete: problems and solutions. In: *Spatial restructuring of territories: International Baikal investment and construction forum. IOP conference series: earth and environmental science*. 4 December 2020, Irkutsk. IOP Publishing Ltd; 2021. Vol. 751. p. 012081. (In Russ.).
11. Rabinovich F.N. Composites based on dispersed reinforced concrete. Questions of theory and design, technology, construction. Moscow: PH of the Association of construction universities; 2004. 560 p. (In Russ.).
12. Rabinovich F.N., Romanov V.P. On the crack resistance limit of fine-grained concrete reinforced with steel fibers. *Mekhanika kompozitnykh materialov*. 1985;2:277-283. (In Russ.).
13. Rabinovich F.N. On optimal reinforcement of steel-fiber concrete structures. *Beton i zhelezobeton*. 1986;3:17-19. (In Russ.).
14. Magdeev U.Kh., Morozov V.I., Puharenko Iu.V. Cracking of dispersion-reinforced concrete in terms of fracture mechanics. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = News of the Kazan state university of architecture and engineering*. 2012;1:110-117. (In Russ.). EDN: PASJVV.
15. Shlyakhtina T.F., Popov N.A. Improving the efficiency of winter concreting due to dispersed reinforcement. *Trudy Bratskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Estestvennye i inzhenernye nauki = Proceedings of the Bratsk State University. Series: Natural and Engineering Sciences*. 2022;1:128-134. (In Russ.). EDN: PVBVLV.
16. Klyuev S.V., Khezhev T.A., Pukharenko Yu.V., Klyuev A.V. Fiber concrete on the basis of composite binder and technogenic raw materials. *Materials science forum*. 2018;931:603-607. (In Russ.). <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.931.603>. EDN: DHNQPT.
17. Fedjuk R.S., Liseitsev Y.L., Taskin A.V., Timokhin R.A., Klyuev S.V., Cesar C. Increasing in impact viscosity of fiber-ash-concrete. *Stroitel'nye materialy i izdeliya = Construction materials and products*. 2020;3(6):5-16. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-6-5-16>. EDN: YTZIUC.
18. Pukharenko Yu.V., Zhavoronkov M. I., Panteleev D. A. Improvement of methods for determining power and energy characteristics of fibre-reinforced concrete crack resistance. *Vestnik MGSU = Vestnik MGSU*. 2019;14(3):301-310. (In Russ.). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.3.301-310>. EDN: VOUYOL.
19. Kolchunov V.I., Kuznetsova K.Yu., Fedorov S.S. Crack resistance of prestressed reinforced concrete frame structure systems under special impact. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and reconstruction*. 2021;3:15-26. (In Russ.). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-15-26>. EDN: KUEOPV.
20. Zherebtsov Yu.V., El'shaeva D.M., Lukhneva Yu.N., Dotsenko N.A., Samofalova M.S., Kurasanov P.R., et al. Effect of recipe factors on mechanical properties of heavyweight steel fibre reinforced concrete. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2021;11(2):250-259. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2021-2-250-259>.
21. Parfenov A.A., Sivakova O.A., Gusar' O.A., Balakireva V.V. Operation and destruction of concrete at high and low temperatures. *Stroitel'nye materialy = Construction materials*. 2019;3:64-67. (In Russ.). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-768-3-64-66>. EDN: ZIKFHV.

Информация об авторах

Шляхтина Татьяна Федоровна,

к.т.н., доцент,
доцент кафедры
строительных конструкций
и технологии строительства,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия,
e-mail: t_shlyahatina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-8091-2212>
Author ID: 588088

Курицына Анна Михайловна,

к.т.н., доцент кафедры
строительных конструкций
и технологии строительства,
Братский государственный университет,
665709, г. Братск, ул. Макаренко, 40, Россия,
e-mail: tigannet@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-5706-8460>
Author ID: 588089

Information about the authors

Tatiana F. Shlyahatina,

Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor,
Associate Professor of the Department
of Building Structures and Construction
Technologies,
Bratsk State University,
40 Makarenko str., Bratsk, 665709, Russia,
e-mail: t_shlyahatina@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0002-8091-2212>
Author ID: 588088

Anna M. Kuricyna,

Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor
of Departments of Building structures
and construction technologies,
Bratsk State University,
40 Makarenko St., Bratsk 665709, Russia,
e-mail: tigannet@mail.ru
<https://orcid.org/0009-0003-5706-8460>
Author ID: 588089

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors

The authors contributed equally to this article.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Информация о статье

Статья поступила в редакцию 01.09.2023.
Одобрена после рецензирования 18.09.2023.
Принята к публикации 19.09.2023.

Information about the article

The article was submitted 01.09.2023.
Approved after reviewing 18.09.2023.
Accepted for publication 19.09.2023.