Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона

Ю.В. Пухаренко, М.И. Жаворонков, Д.А. Пантелеев

*Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ),
190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4*

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрена актуальная проблема совершенствования методов экспериментальных исследований свойств фибробетонов, получаемых с применением различных видов фибры. В результате анализа технической литературы установлены недостатки существующих методов испытаний одной из важнейших характеристик фибробетона — трещиностойкости. Цель данного исследования — развитие методов определения характеристик трещиностойкости фибробетона.

Материалы и методы. В качестве основы при разработке нового метода и устройства использован ГОСТ 29167, положения которого направлены на получение наиболее информативных данных о материале путем построения диаграмм зависимости прогибов испытываемых образцов от прилагаемых нагрузок и определения с их помощью силовых и энергетических характеристик трещиностойкости. Испытывались образцы-балки мелкозернистого фибробетона, изготовленного с применением стальной проволоочной фибры круглого сечения и волнового профиля. Построены диаграммы зависимостей прогибов образцов от прилагаемых нагрузок в процессе их испытаний на растяжение при изгибе. Произведены расчеты силовых и энергетических характеристик трещиностойкости.

Результаты. Разработаны и апробированы устройство и методика испытаний трещиностойкости фибробетона. Проведен сравнительный анализ результатов испытаний сталефибробетонных образцов.

Выводы. Предлагаемые устройство и методика позволяют быстро и с минимальными трудозатратами на подготовку и испытания исследовать влияние параметров фибрового армирования на характеристики трещиностойкости фибробетона. Повышение достоверности получаемых данных способствует формированию новых направлений исследований и скорейшему внедрению фибробетонов в строительное производство. В результате анализа полученных данных установлено, что предлагаемые устройство и методика могут быть рекомендованы для проведения исследований влияния параметров фибрового армирования на свойства получаемых фибробетонов и накопления статистических данных для разработки и совершенствования нормативно-технических документов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: фибробетон, стальная проволоочная фибра, прочность на растяжение при изгибе, устройство, методика, испытание, диаграмма зависимости прогиба от прилагаемой нагрузки, критический коэффициент интенсивности напряжений, силовые и энергетические характеристики трещиностойкости

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: 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. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.301-310

Improvement of methods for determining power and energy characteristics of fibre-reinforced concrete crack resistance

Yuri V. Pukharenko, Mikhail I. Zhavoronkov, Dmitry A. Panteleev

*Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU),
4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation*

ABSTRACT

Introduction. The actual problem of improving the methods of experimental studies of the properties of fibre-reinforced concrete obtained using various types of fibre is considered in the article. As a result of the analysis of the technical literature, some shortcomings of the existing test methods of one of the most important characteristics of fibre-reinforced concrete, crack resistance, were revealed. The aim of this study is to develop methods for determining the fibre-reinforced concrete crack resistance parameters.

Materials and methods. The GOST 29167 standard is used as a basis for the development of a new method and device. Regulations of this standard pursue an aim of obtaining the most informative data about the material by plotting the dependences of test specimen deflections on the applied loads and determining with their assistance the power and energy parameters of the crack resistance. The test samples are presented by fibre-reinforced fine concrete beams made using steel wire fibre of circular cross-section and wave profile. Diagrams of the dependences of sample deflections on applied loads were plotted in the course of the tests for tension in bending. Calculations of power and energy parameters of crack resistance were conducted.

Results. The device and method of testing the fibre-reinforced concrete crack resistance are developed and proved. A comparative analysis of the results of tests of steel fibre concrete samples is made.

Conclusions. The proposed device and method allow researching influence of the fibre reinforcement parameters on fibre-reinforced concrete crack resistance parameters quickly and with minimal labour expenditures for preparation and tests. Increased adequacy of the obtained data promotes building up new trends in research and rapid introduction of fibre-reinforced concrete in the construction industry. As a result of the analysis of the obtained data, it is established that the proposed device and method can be recommended for research of the influence of fibrous reinforcement parameters on the obtained fibre-reinforced concrete properties and accumulation of statistical data for the development and improvement of normative and technical documents.

KEYWORDS: fibre-reinforced concrete, steel wire fibre, bending tensile strength, device, method, test, dependence of deflection on applied load, critical stress intensity factor, power and energy parameters of crack resistance

FOR CITATION: Pukharens Y.V., Zhavoronkov M.I., Pantelev D.A. Improvement of methods for determining power and energy characteristics of fibre-reinforced concrete crack resistance. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2019; 14:3:301-310. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.301-310

ВВЕДЕНИЕ

Современный уровень развития строительной отрасли требует применения эффективных строительных материалов и изделий, обладающих особыми свойствами и характеристиками; прогрессивных технологий их производства; постоянного совершенствования нормативно-технической базы проектирования строительных конструкций. Большинство предпринимаемых мероприятий направлено на достижение определенного компромисса, при котором строительные материалы и конструкции приобретают улучшенные показатели качества и при этом не требуют повышения трудовых, энергетических и материальных ресурсов на свое производство и эксплуатацию. Одним из наиболее перспективных в ряду таких строительных материалов является фибробетон.

Известно множество научных работ, посвященных свойствам и характеристикам фибробетона, его поведению под нагрузкой, стойкости к коррозионным и другим воздействиям [1–13]. Имеются данные по изучению свойств композитов, получаемых как с применением отдельных видов фибры, так и их комбинаций [14–18]. В таких работах, как правило, обязательно указывается вид использованной фибры и приводится ее описание. Таким образом постоянно пополняется многообразие армирующих волокон, что, в свою очередь, позволяет получать фибробетоны, обладающие совершенно разными, в том числе особыми свойствами и характеристиками. В этой ситуации важнейшим вопросом, возникающим при проектировании фибробетонных конструкций, является выбор вида фибры и обоснование этого выбора. Это доказывает необходимость изучения отдельных видов фибры, их комбинаций и композитов, получаемых на их основе. Подобные исследования требуют комплексного подхода, особенно в случае нового вида фибры, что делает

их достаточно трудоемкими, в связи с чем особую актуальность приобретают научные работы, направленные на совершенствование методик экспериментальных исследований свойств фибробетона.

Цель данной работы — разработка устройства и методики определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона, позволяющих максимально упростить предварительную подготовку контрольных образцов к испытаниям, ускорить процесс их проведения, максимально автоматизировать процесс обработки получаемых результатов.

Известно, что традиционный бетон и железобетон обладают таким недостатком, как низкая трещиностойкость. Понятие трещиностойкости, вязкости разрушения, определяется способностью материала сопротивляться образованию и развитию трещин. Очевидно, что введение в состав бетона фибры способствует увеличению трещиностойкости, поскольку в случае образования трещины в образце, изделии или конструкции волокна, пересекающие эту трещину, ограничивают ее развитие.

Как правило, трещиностойкость численно характеризуется критическим коэффициентом интенсивности напряжений. Существует множество методов экспериментального определения этой характеристики, которые реализуют различные подходы к проведению испытаний контрольных образцов, содержат свои достоинства и недостатки. Так, например, в технической литературе описывается устройство для проведения испытаний фибробетонного образца-балки на растяжение при изгибе, позволяющее определить момент образования магистральной трещины в координатах «нагрузка — деформации» и по полученным данным рассчитать коэффициент интенсивности напряжений. В других работах приводится метод определения коэффициента интенсивности напряжений по образцам-кубам с заранее сделанными надрезами и нагружаемыми

по особой схеме для обеспечения образования трещин нормального отрыва и поперечного сдвига. В некоторых трудах указывается на применение специфического оборудования для проведения испытаний трещиностойкости. Существует также стандартный метод определения коэффициента интенсивности напряжений бетона, регламентируемый ГОСТ 29167-91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», который требует испытывать образцы-балки на растяжение при трехточечном изгибе. При этом в ходе испытаний контролируется прогиб образца и прилагаемая нагрузка, и по полученным данным строится диаграмма для определения характеристик трещиностойкости [19–21].

Анализ имеющихся методов испытаний позволил установить некоторые их недостатки, заключающиеся в необходимости изготовления нестандартных образцов, малой информативности получаемых данных, высокой трудоемкости проведения эксперимента, недостаточной точности результатов эксперимента и необходимости использования сложного и дорогостоящего оборудования. Все это было учтено при разработке описываемого метода и устройства.

При проведении исследований в качестве базового принят метод, закрепленный положениями ГОСТ 29167-91 и позволяющий получать наиболее информативные данные. В соответствии с этим предложено специальное устройство, по точности и принципу работы отвечающее требованиям используемого ГОСТа. В ходе проведения испытаний разработанное устройство устанавливается в стандартный лабораторный пресс; специальные упоры, предусмотренные в его конструкции, обеспечивают изгиб образцов-балок, в процессе которого контролируется прогиб образца и прилагаемая к нему нагрузка.

На предварительных этапах изучения установлена необходимость и обеспечена высокая точность контроля прогибов образца на стадии его упругой работы. В результате был определен общий вид диаграммы разрушения фибробетонного образца, представленный на рис. 1.

Следует отметить, что при испытании любого фибробетонного образца по данной методике, диаграмма всегда будет содержать указанные ключевые точки, координаты которых будут меняться в зависимости от вида и расхода фибры. Точка О соответствует началу испытания, а точка D показывает окончание диаграммы. По точке С (наивысшей точке диаграммы) определяются прочность на растяжение при изгибе и критический коэффициент интенсивности напряжений. Особое значение имеют координаты точки Т, так как она показывает окончание действия упругих деформаций образца и начало процесса микротрещинообразования. Поскольку участок диаграммы ОТ описывает процесс упругого деформирования образца, то он должен быть линейно восходящим. Все мероприятия по обеспечению высокой точности контроля прогибов были направлены преимущественно на получение координат именно этого участка диаграммы разрушения [22].

Применение тензорезисторов для контроля упругих деформаций образца показало высочайшую эффективность, однако значительно усложнило предварительную подготовку образцов к испытаниям. Кроме того, использованные проволоочные тензорезисторы предназначены для однократного использования и имеют высокую стоимость. Несмотря на то, что удалось разработать и применить новую методику и устройство, получить новые экспериментальные данные, стали очевидны направления дальнейшего развития методики и совершенствования устройства для проведения испытаний трещиностойкости фибробетона.

Рис. 1. Общий вид диаграммы разрушения фибробетонного образца

Fig. 1. General view of diagram of fibre-reinforced concrete sample failure

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

При разработке нового устройства, так же как и в ранее разработанном, применена неравновесная схема испытаний из-за простоты ее реализации. В этом случае характеристики трещиностойкости согласно ГОСТ 29167-91 определяются как условные. Общий вид разработанного устройства представлен на рис. 2.

При разработке данного прибора было принято решение отказаться от использования лабораторного пресса и реализовать самостоятельное нагружающее устройство, которое представляет собой две параллельно расположенные винтовые пары, смонтированные таким образом, что нагружение образца производится линейно перемещающимися гайками с закрепленной на них распределительной

балкой. Отказ от лабораторного пресса повысил мобильность устройства, а применение винтовых пар упростило управление скоростью нагружения. Более детально важнейшие узлы прибора представлены на рис. 3.

Синхронное вращение винтовых пар обеспечивает перемещение распределительной балки, и таким образом происходит нагружение образца. Приложение нагрузки в горизонтальной плоскости позволило исключить влияние на процесс разрушения образца его собственной массы и упростило конструкцию устройства.

Контроль прилагаемых нагрузок осуществляется тензометрическим датчиком, исполненным в виде одной из трех нагружающих точек. По рис. 3 видно, что как точный, так и грубый контроль перемещений образца производится четырьмя устройствами.

Рис. 2. Общий вид разработанного устройства

Fig. 2. General view of the developed device

Рис. 3. Разработанное устройство: 1 — пульт управления нагружающим устройством; 2 — распределительная балка нагружающего устройства; 3 — электронный блок для сбора показаний измерительных приборов; 4 — макет испытываемого образца; 5 — цифровые индикаторы часового типа для точного контроля прогиба образца; 6 — потенциометры для грубого контроля прогиба образца; 7 — одна из двух винтовых пар; 8 — точки приложения нагрузки

Fig. 3. Developed device: 1 — loading device control panel; 2 — loading device distribution beam; 3 — electronic unit for gathering readings of measuring instruments; 4 — tested sample model; 5 — digital indicators for fine sample deflection monitoring; 6 — potentiometers for coarse sample deflection monitoring; 7 — one of two screw pairs; 8 — load application points

Такой подход позволил исключить влияние на точность механических уплотнений в конструкции нагружающего устройства и деформацию образца в местах контакта с точками приложения нагрузки. Точность контроля прогибов обеспечивается тем, что он определяется расчетным путем по разности показаний двух измерительных приборов по одну сторону от образующейся в образце трещины. Дисcretность шкалы индикаторов составляет 0,001 мм, а потенциометров — 0,1 мм.

Все контролируемые величины с помощью несложного схематического решения обрабатываются автоматически в процессе проведения испытания, отправляются во встроенный в устройство компьютер и отображаются в виде диаграммы зависимости прогибов образцов от прилагаемых к ним нагрузок. После окончания испытания полученная диаграмма обрабатывается в соответствии с требованиями ГОСТ 29167-91. По ней проводятся дополнительные построения и далее по ним определяются энергосодержание на различных этапах деформирования и разрушения, а также прочность на растяжение при изгибе и критический коэффициент интенсивности напряжений.

Разработанное устройство опробовано при испытании образцов фибробетона, изготовленного с применением стальной проволоочной фибры для оценки степени влияния ее расхода на характеристики трещиностойкости.

При производстве образцов фибробетона в качестве матрицы использовался мелкозернистый бетон, позволивший добиться высокой степени дисперсности распределения стальных волокон. Состав бетонной смеси для изготовления всех образцов был одинаковым: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,32 и расходе добавки суперпластификатора 0,7 % от массы цемента. Для получения образцов применялись кварцевый песок с наибольшей крупностью зерен 5 мм и модулем крупности $M_{кр} = 2,34$ и бездобавочный портландцемент марки ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент». В качестве дисперсной арматуры использовалась фибра стальная проволоочная круглого сечения волнового профиля диаметром 0,3 мм и длиной 22 мм.

Все исследования проводились на образцах — балках размером 70 × 70 × 280 мм. Размеры образцов выбраны с учетом крупности применяемого заполнителя в соответствии с требованиями ГОСТ 29167. Их твердение происходило в условиях тепловлажностной обработки в пропарочной камере при температуре изотермической выдержки 80 °С по режиму 2 + 5 ч, охлаждение вместе с камерой, после чего они хранились в воздушно-сухих условиях лаборатории в течение 14 сут.

Контроль равномерности распределения волокон проводился по готовым фибробетонным образцам магнитометрическим методом. На каждой из продольных граней образца определялась маг-

нитная восприимчивость, а затем — коэффициент вариации по четырем граням каждого образца. Во всей серии испытанных образцов коэффициент вариации не превысил 6 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки степени влияния расхода фибры на характеристики трещиностойкости фибробетона было изготовлено несколько образцов — балок, расход волокон в которых составлял 0,5 и 2 % по объему, также был изготовлен неармированный образец.

Диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, полученные при испытании образцов, представлены на рис. 4.

Для более детального рассмотрения зоны упругого деформирования образцов на рис. 5 представлена часть тех же диаграмм, но в большем масштабе.

По диаграммам на рис. 5 видны линейно восходящие участки, отражающие процесс упругого деформирования образцов. При этом отчетливо виден момент, когда восходящий участок диаграммы становится нелинейным, то есть процесс упругого деформирования заканчивается и начинается микротрещинообразование, переходящее в развитие магистральной трещины. Этот момент диаграммы обозначается точкой Т. В случае недостаточной точности испытательного оборудования определение координат точки Т может оказаться затруднительным.

По рис. 4 и 5 очевидно, что процесс упругопластического деформирования (правее точки Т) сопровождается перераспределением прилагаемой к образцу нагрузки преимущественно на волокна. При этом образующаяся магистральная трещина разделяет испытуемый образец на две условные половины, а волокна, пересекающие эту трещину, оказывают сопротивление этому процессу, что сопровождается их вытягиванием из матрицы. Нагрузка, воспринимаемая образцом на этом этапе испытания, оказывается тем больше, чем больше волокон пересекает трещину, то есть при большем расходе волокон повышается трещиностойкость фибробетона. Этот процесс можно численно, в соответствии с положениями ГОСТ 29167, охарактеризовать условными удельными эффективными энергосодержаниями на статическое разрушение.

Численные значения энергосодержания на разных этапах деформирования и разрушения, прочность на растяжение при изгибе и условный критический коэффициент интенсивности напряжений, определенные в процессе исследований, приведены в табл. 1.

По представленным в таблице данным можно отметить прямую зависимость прочности фибробетона при изгибе от расхода фибры. То же можно сказать и об энергосодержании на статическое разрушение, поскольку увеличение расхода волокон способствует увеличению нагрузки, воспринимаемой образцом в процессе проведения испытания, что

Рис. 4. Диаграммы разрушения фибробетонных образцов

Fig. 4. Diagrams of failure of fibre-reinforced concrete samples

Рис. 5. Диаграммы разрушения фибробетонных образцов в большом масштабе

Fig. 5. Large-scale diagrams of failure of fibre-reinforced concrete samples

Табл. 1. Результаты испытаний характеристик трещиностойкости и прочности фибробетонных образцов**Table 1.** Test results of parameters of crack resistance and strength of fibre-reinforced concrete samples

Характеристика / Characteristic	Объемное содержание стальной проволочной фибры, % / Volumetric content of steel wire fibre, %		
	0	0,5	2
G_i^* — условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ² / G_i^* — conditional specific energy consumption for static failure before main cracking initiation, J/m ²	28	33,9	59,33
G_f^* — условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ² / G_f^* — conditional specific effective energy consumption for static failure, J/m ²	25	4229	8833
K_c^* — условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа · м ^{0,5} / K_c^* — conditional critical stress intensity factor, MPa · м ^{0,5}	1,38	1,49	1,8
R_{bt} — прочность на растяжение при изгибе, МПа / R_{bt} — bending tensile strength, MPa	5,79	6,35	11,45

отражается соответствующей площадью под диаграммой разрушения. В отличие от этого, неармированный образец разрушается хрупко, после образования магистральной трещины процесс принимает лавинообразный характер, участок диаграммы разрушения, описывающий пластическое деформирование, получается резко нисходящим и не вносит существенного вклада в соответствующие энергозатраты. Критический коэффициент интенсивности напряжений фибробетона и энергозатраты на разрушение образцов до момента начала движения магистральной трещины также повышаются с увеличением расхода волокон.

ВЫВОДЫ

В результате выполненного литературного обзора и опыта предыдущих исследований разработаны устройство и методика проведения испытаний трещиностойкости фибробетона, в соответствии с которыми автоматизирован процесс построения диаграмм разрушения фибробетонных образцов, а также значительно упрощена предварительная

подготовка образцов к испытаниям. Следует отметить эффективность контроля прогиба в четырех точках, обеспечивающего возможность точного определения координат важнейшей точки Т на диаграммах разрушения фибробетонных образцов.

При использовании разработанного устройства определены силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетона, изготовленного с применением стальной проволочной фибры, установлена степень влияния расхода фибры на эти характеристики и прочность на растяжение при изгибе.

С целью дальнейшего развития данного направления планируется, с помощью разработанного прибора, провести исследования характеристик и свойств фибробетонов, изготовленных с применением других видов фибр для получения достоверных статистических и справочных данных. Накопление такой информации позволит получить более полное представление о фибробетоне в целом, а также может упростить обоснование выбора вида фибры при проектировании фибробетонных изделий и конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Skoruk O.M. Deformation of steel fiber concrete slabs that are counter supported under recurring load // WORLD SCIENCE : International Scientific and Practical Conference . 2016. Vol. 1. No. 3 (7). Pp. 103–108.
2. Тахери Фард А.Р., Сохели Х., Рамзани Мовафах С., Фарнуд Ахмади П. Совместное действие стеклянной и полипропиленовой фибры на механические свойства самоуплотняющихся бетонов // Инженерно-строительный журнал. 2016. № 2 (62). С. 26–31. DOI: 10.5862/MCE.62.3
3. Lee S.-J., Won J.-P. Flexural behavior of precast reinforced concrete composite members reinforced with structural nano-synthetic and steel fibers // Composite Structures. 2014. Vol. 118. Pp. 571–579. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.07.042
4. Yoo D.-Y., Lee J.-H., Yoon Y.-S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites // Composite Structures. 2013. Vol. 106. Pp. 742–753. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.033

5. Dong Joo Kim, Seung Hun Park, Gum Sung Ryu, Kyung Taek Koh. Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers // *Construction and Building Materials*. 2011. Vol. 25. Pp. 4144–4155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051
6. Mobasher B., Bakhshi M., Barsby C. Backcalculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 70. Pp. 243–253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.037
7. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 94. Pp. 73–82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051
8. Garcia-Taengua E., Arango S., Marti-Vargas J.R., Serna P. Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 65. Pp. 321–329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.139
9. Kim H., Kim G., Nam J., Kim J., Han S., Lee S. Static mechanical properties and impact resistance of amorphous metallic fiber-reinforced concrete // *Composite Structures*. 2015. Vol. 134. Pp. 831–844. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.128
10. Won J.-P., Hong B.-T., Choi T.-J., Lee S.-J., Kang J.-W. Flexural behaviour of amorphous micro-steel fibre-reinforced cement composites // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94. Issue 4. Pp. 1443–1449. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.11.031
11. Choi S.-J., Hong B.-T., Lee S.-J., Won J.-P. Shrinkage and corrosion resistance of amorphous metallic-fiber-reinforced cement composites // *Composite Structures*. 2014. Vol. 107. Pp. 537–543. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.08.010
12. Won J.-P., Hong B.-T., Lee S.-J., Choi S.-J. Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites // *Composite Structures*. 2013. Vol. 102. Pp. 101–109. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.02.015
13. Yang J.-M., Kim J.-K., Yoo D.-Y. Effects of amorphous metallic fibers on the properties of asphalt concrete // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 128. Pp. 176–184. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.082
14. Correal J.F., Herrán C.A., Carrillo J., Reyes J.C., Hermida G. Performance of hybrid fiber-reinforced concrete for low-rise housing with thin walls // *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 185. Pp. 519–529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.048
15. Коротких Д.Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетонов для повышения их вязкости разрушения // *Вестник гражданских инженеров*. 2009. № 3 (20). С. 126–128.
16. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера // *SWorld : сб. науч. тр.* Т. 43. Вып. 1. Одесса : КУПРИЕНКО, 2013. С. 60–64.
17. Пантелеев Д.А. Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер. : Строительство и архитектура*. 2015. № 41 (60). С. 44–52.
18. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 1 (60). С. 172–176.
19. Жаворонков М.И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015. № 3 (33). С. 114–120.
20. Жаворонков М.И. Методика определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона // *Вестник гражданских инженеров*. 2014. № 6 (47). С. 155–160.
21. Магдеев У.Х., Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. 2013. № 31–2 (50). С. 132–135.
22. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Диаграммы деформирования цементных композитов, армированных стальной проволоочной фиброй // *Academia. Архитектура и строительство*. 2018. № 2. С. 143–147. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-2-143-147

Поступила в редакцию 21 сентября 2018 г.
 Принята в доработанном виде 3 декабря 2018 г.
 Одобрена для публикации 27 февраля 2019 г.

ОБ АВТОРАХ: Пухаренко Юрий Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительных материалов и метрологии, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, tsik@spbgasu.ru;

Жаворонков Михаил Ильич — ассистент кафедры технологии строительных материалов и метрологии, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, sith07@list.ru;

Пантелеев Дмитрий Андреевич — кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительных материалов и метрологии, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, dm-pant@yandex.ru.

REFERENCES

1. Skoruk O.M. Deformation of steel fiber concrete slabs that are counter supported under recurring load. *WORLD SCIENCE : International Scientific and Practical Conference*. 2016; 1: 3(7):103-108.
2. Taheri Fard A.R., Soheili H., Ramzani Movafagh S., Farnood Ahmadi P. Combined effect of glass fiber and polypropylene fiber on mechanical properties of self-compacting concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2016; 2(62):26-31. DOI: 10.5862/MCE.62.3
3. Lee S.-J., Won J.-P. Flexural behavior of precast reinforced concrete composite members reinforced with structural nano-synthetic and steel fibers. *Composite Structures*. 2014; 118:571-579. DOI: 10.1016/j.compstruct.2014.07.042
4. Yoo D.-Y., Lee J.-H., Yoon Y.-S. Effect of fiber content on mechanical and fracture properties of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2013; 106:742-753. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.07.033
5. Dong Joo Kim, Seung Hun Park, Gum Sung Ryu, Kyung Taek Koh. Comparative flexural behavior of hybrid ultra high performance fiber reinforced concrete with different macro fibers. *Construction and Building Materials*. 2011; 25:4144-4155. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2011.04.051
6. Mobasher B., Bakhshi M., Barsby C. Back-calculation of residual tensile strength of regular and high performance fiber reinforced concrete from flexural tests. *Construction and Building Materials*. 2014; 70:243-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.07.037
7. Afroughsabet V., Ozbakkaloglu T. Mechanical and durability properties of high-strength concrete containing steel and polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*. 2015; 94:73-82. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.06.051
8. Garcia-Taengua E., Arango S., Marti-Vargas J.R., Serna P. Flexural creep of steel fiber reinforced concrete in the cracked state. *Construction and Building Materials*. 2014; 65:321-329. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.139
9. Kim H., Kim G., Nam J., Kim J., Han S., Lee S. Static mechanical properties and impact resistance of amorphous metallic fiber-reinforced concrete. *Composite Structures*. 2015; 134:831-844. DOI: 10.1016/j.compstruct.2015.08.128
10. Won J.-P., Hong B.-T., Choi T.-J., Lee S.-J., Kang J.-W. Flexural behaviour of amorphous micro-steel fibre-reinforced cement composites. *Composite Structures*. 2012; 94(4):1443-1449. DOI: 10.1016/j.compstruct.2011.11.031
11. Choi S.-J., Hong B.-T., Lee S.-J., Won J.-P. Shrinkage and corrosion resistance of amorphous metallic-fiber-reinforced cement composites. *Composite Structures*. 2014; 107:537-543. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.08.010
12. Won J.-P., Hong B.-T., Lee S.-J., Choi S.-J. Bonding properties of amorphous micro-steel fibre-reinforced cementitious composites. *Composite Structures*. 2013; 102:101-109. DOI: 10.1016/j.compstruct.2013.02.015
13. Yang J.-M., Kim J.-K., Yoo D.-Y. Effects of amorphous metallic fibers on the properties of asphalt concrete. *Construction and Building Materials*. 2016; 128:176-184. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.082
14. Correal J.F., Herrán C.A., Carrillo J., Reyes J.C., Hermida G. Performance of hybrid fiber-reinforced concrete for low-rise housing with thin walls. *Construction and Building Materials*. 2018; 185:519-529. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.048
15. Korotkikh D.N. Multilevel disperse reinforcement of concrete structures for improving its fracture toughness characteristics. *Bulletin of Civil Engineers*. 2009; 3(20):126-128. (rus.).
16. Puharenko Y.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Efficacy of polyreinforcement fibrous of Different sizes of steel fibers. *SWorld : collection of proceedings*. Vol. 43. Issue 1. Odessa, Kuprienko, 2013; 1:60-64. (rus.).
17. Panteleev D.A. Nonrigid and strength characteristics of polyreinforced aiber concrete. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Ser. : Civil Engineering and Architecture*. 2015; 41(60):44-52. (rus.).
18. Pukharenko Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Determination of fiber contribution in creation of the strength of steel fiber reinforced concrete. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017; 1(60):172-176. (rus.).
19. Zhavoronkov M.I. Determining characteristics of the destruction and elasticity modulus of fiber-reinforced concrete. *News Kazanskogo State Univer-*

sity of architecture and construction. 2015; 3(33):114-120. (rus.).

20. Zhavoronkov M.I. Method of determining the energy and power characteristics of the of fiber-reinforced concrete destruction. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014; 6(47):155-160. (rus.).

21. Magdeev U.Kh., Pukharenko Yu.V., Morozov V.I., Pantelev D.A., Zhavoronkov M.I. Investigation of properties of steel-fiber-concrete on the basis of

amorphous metallic fiber. *Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013; 31-2(50):132-135. (rus.).

22. Pukharenko Yu.V., Pantelev D.A., Zhavoronkov M.I. Diagrams of deformation of cement composites reinforced with steel wire fiber. *Academia. Architecture and Construction*. 2018; 2:143-147. DOI: 10.22337/2077-9038-2018-2-143-147 (rus.).

Received September 21, 2018

Adopted in a revised form on December 3, 2018

Approved for publication February 27, 2019.

ABOUT THE AUTHORS: **Yuri V. Pukharenko** — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Building Materials Technology and Metrology, **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**, 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, tsik@spb-gasu.ru;

Mikhail I. Zhavoronkov — Assistant of Department of Building Materials Technology and Metrology, **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**, 4, 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, sith07@list.ru;

Dmitry A. Pantelev — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Building Materials Technology and Metrology, **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**, 4 2nd Krasnoarmeyskaya st., Saint-Petersburg, 190005, Russian Federation, dm-pant@yandex.ru.