

УДК 666.974.2

**В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко***ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»*

## **ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ФИБРОБЕТОНА В КОНСТРУКЦИЯХ ПРИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

Приведены результаты исследований ударостойкости фибробетона и рекомендации по его применению при изготовлении монолитных конструкций пола промышленных зданий и забивных свай.

**Ключевые слова:** фибра, бетон, фибробетон, бетонные конструкции, ударостойкость бетона, динамические воздействия.

Высокая структурная вязкость фибробетонов, благодаря которой они приобретают значительную стойкость при динамических нагрузках, в т.ч. ударных, обусловила их применение в тяжелых эксплуатационных условиях, в которых первостепенным является повышение функциональных характеристик и долговечности конструкций, а вопросы стоимости отступают на второй план. Таким образом, применение методов дисперсного армирования наиболее перспективно в области хрупких высокопористых материалов на минеральных вяжущих, например, таких как ячеистый бетон, для которого фибровое армирование целесообразно во всех случаях [1, 2]. В то же время многочисленные исследования, проводимые в течение многих лет в России и за рубежом, убедительно показывают, что и в других случаях, независимо от средней плотности матрицы и вида применяемых волокон, ударостойкость бетона в результате дисперсного армирования возрастает в несколько раз [3—8]. При этом отмечается, что степень повышения сопротивляемости ударным и другим динамическим воздействиям определенным образом зависит от геометрических характеристик используемых волокон, их количества в смеси, дисперсности минеральных компонентов в составе матрицы, а также от технологии изготовления изделий. Одновременно установлено [2], что при концентрации армирующих волокон в объеме тяжелого бетона в пределах  $\mu = 1 \dots 3$  % применение низкомолекулярных полимерных волокон обеспечивает получение композита, не уступающего по ударостойкости сталефибробетону и при этом более экономичного. Тем не менее утверждается [2], что с точки зрения повышения ударостойкости бетона наиболее эффективны высокомолекулярные волокна. Данное положение отчасти подтверждается результатами наших исследований, согласно которым введение в состав плотного мелкозернистого бетона полимерных фибр с модулем упругости  $E_b = 4650$  МПа в количестве  $1 \dots 2$  % по объему приводит к увеличению его ударостойкости в  $2 \dots 5$  раз, в то время как в ячеистом бетоне, по отношению к которому такие волокна являются высокомолекулярными, повышение сопротивляемости продольному удару при том же уровне армирования может достигать 10 раз [1].

Для более полного представления о влиянии вида, количества армирующих волокон и их физико-механических характеристик на ударостойкость мел-

козернистого бетона проведены экспериментальные исследования, сущность которых заключается в следующем.

Образцы цементно-песчаного бетона размером 7×7×28 см изготавливались из смеси состава Ц : П = 1 : 2 при водоцементном отношении В/Ц = 0,28 с использованием портландцемента марки ПЦ400 Пикалевского завода, песка с  $M_{кр} = 2,14$  и 33%-го раствора суперпластификатора С-3.

Армирование бетона осуществлялось стальной и полимерной фиброй различных типоразмеров, которая вводилась в смесь и равномерно распределялась в процессе ее приготовления в двухвальном лотковом смесителе. Для формования образцов применялась стандартная виброплощадка с гармоническими колебаниями. Время уплотнения в зависимости от вида и количества волокон составляло 20...80 с. Образцы подвергались испытанию на вертикальном копре после ускоренного твердения в пропарочной камере и последующей выдержки в воздушно-сухих условиях в течение 14 сут. В процессе испытаний образец устанавливался на металлическое основание копра, сверху на него укладывалась металлическая пластина толщиной 10 мм, и производился удар молотом массой 50 кг, свободно падающим с высоты 0,3 м. Ударостойкость оценивалась энергией, затраченной на образование трещин:

$$A^{уд} = \frac{PgHn}{L_{тр}},$$

где  $P$  — масса молота;  $g$  — ускорение свободного падения;  $H$  — высота падения молота;  $n$  — количество ударов;  $L_{тр}$  — длина образовавшихся трещин (усредненное значение по всем граням образца).

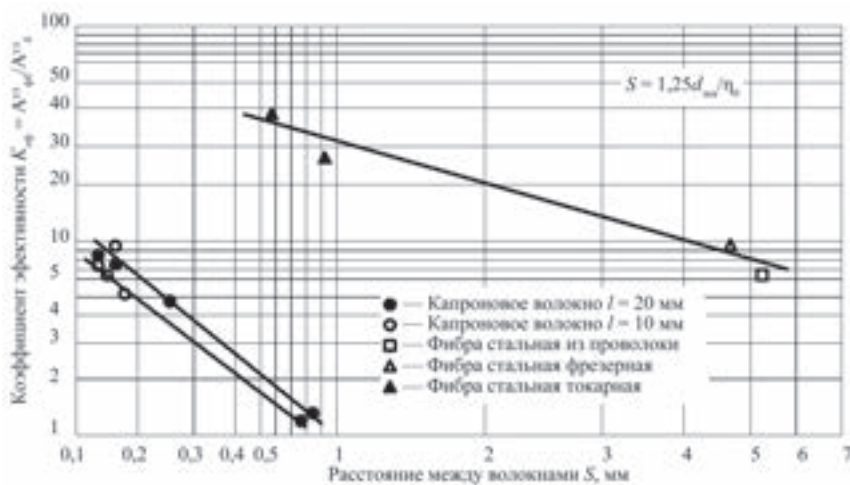
Результаты определения сопротивляемости фибробетонов продольному удару приведены в табл. 1 и на рисунке.

Табл. 1. Влияние вида и количества волокон на ударостойкость фибробетонов

Вид фибры	Объемный процент армирования $\mu_0$	Размеры волокон, мм		$A^{уд}$ , Дж/см	Коэффициент эффективности $K_{эф} = A_{фб}^{уд} / A_б^{уд}$
		$l$	$d_{экв}$		
1. Бетон без волокон	—	—	—	10,0	1,0
2. Отрезки комплексных капроновых нитей	0,10	10	0,02	11,5	1,1
	0,92			30,0	3,0
	1,84			52,0	5,2
	2,80			65,0	6,5
	3,70			74,0	7,4
3. Отрезки комплексных капроновых нитей	0,10	20	0,2	12,0	1,2
	0,92			48,0	4,8
	1,84			75,0	7,5
	2,80			95,0	9,5
	3,70			87,0	8,7
4. Фибра стальная из проволоки круглого сечения с волнистым анкером по длине	1,35	50	0,5	70,0	7,0

Окончание табл. 1

Вид фибры	Объемный процент армирования $\mu_0$	Размеры волокон, мм		$A^{уд}$ , Дж/см	Коэффициент эффективности $K_{эф} = A^{уд}_{фб} / A^{уд}_б$
		$l$	$d_{экр}$		
5. Фибра стальная фрезерная с волокнистым анкером по длине	2,92	36	0,6	97,5	9,8
6. Фибра стальная токарная гладкая	5,07 10,27	11	0,16	261,0 370,0	26,1 37,0



Зависимость ударостойкости фибробетона от вида волокон и расстояния между ними в объеме матрицы

Анализ приведенных данных позволяет сделать следующие выводы:

в пределах  $\mu_0 = 1,5 \dots 3,0$  % армирование мелкозернистого бетона низкомолекулярными полимерными волокнами оказывается не менее эффективным, чем стальной фиброй. При этом ударостойкость возрастает с увеличением относительной длины волокон;

при повышении концентрации фибр в смеси до  $\mu_0 = 5 \dots 10$  % значение их модуля упругости становится определяющим в обеспечении высокой ударостойкости фибробетона;

эффективность волокон при продольном ударе определяется не столько их количеством, сколько расстоянием между ними в структуре композита. При этом между коэффициентом эффективности и дисперсностью армирования существует зависимость:

$$K_{эф} = AS^{1/n},$$

где  $A$  и  $n$  — константы, зависящие от вида и свойств применяемых фибр.

Таким образом, стойкость фибробетона при динамических воздействиях определяется теми же факторами и при их варьировании изменяется по тем же законам, что и его статическая прочность.

Полученные данные позволяют рекомендовать фибробетон для использования в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям.

Ниже показана эффективность реального внедрения фибробетона в практику строительства в Санкт-Петербурге на двух примерах изготовления и применения монолитных и сборных конструкций, работающих при динамических воздействиях, в т.ч. для изготовления полов промышленных зданий различного назначения и забивных свай повышенной ударостойкости.

В соответствии с техническим заданием, выданным предприятием ЗАО «ОМЕГА», ставилась задача на проектирование конструктивного решения основания и монолитной плиты пола под динамические воздействия. В отличие от традиционно применяемых в таких случаях вариантов из железобетона (базовый вариант) были приняты к исследованиям и разработке конструктивно-технологические решения основания и монолитной плиты с использованием фибрового армирования. Были проведены теоретические и экспериментальные исследования системы фибробетонная плита — грунтовое основание, разработаны принципиальные конструктивно-технологические решения плиты пола с последующим выбором наиболее рациональной конструкции.

На основании прочностных, деформационных расчетов и расчетов трещиностойкости плиты с учетом всех вариантов сочетаний нагрузок и воздействий [9, 10] рассматривались четыре варианта конструкции пола:

1) плита толщиной 200 мм из бетона класса В22,5, армированная двумя сетками диаметром 10 А III с шагом 150 мм (базовый вариант);

2) плита толщиной 200 мм из бетона класса В25, армированная понизу сеткой диаметром 10 А III с шагом 200 мм и поверху стальной фрезерной фиброй «Харекс» на глубину 80...100 мм;

3) плита толщиной 250 мм из бетона класса В25, армированная понизу и поверху стальной фиброй «Харекс» на глубину 80...100 мм;

4) плита толщиной 180 мм из бетона класса В25 с армированием стальной фиброй «Харекс» всего сечения или понизу и поверху на глубину 80 мм.

Состав бетона класса В22,5 и В25 с подвижностью смеси, характеризующейся осадкой конуса ОК = 15 см, определялся при использовании следующих исходных компонентов:

портландцемент марки ПЦ400 Д20 с активностью 40 МПа;

песок средней крупности с водопотребностью 7 % и истинной плотностью 2,63 кг/л;

щебень гранитный фракции 10...20 с насыпной плотностью 1,3 кг/л и истинной плотностью 2,6 кг/л.

Расходы материалов для четырех вариантов плиты, включая армирование, приведены в табл. 2 и 3.

Табл. 2. Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> плиты

№ п/п	Класс бетона	Осадка конуса, см	Расход материалов, кг					Фибра
			Цемент	Щебень	Песок	Вода	Арматура	
1	В22,5	15	370	1000	750	210	82,0	—
2	В25	15	380	1000	730	215	30,5	31,0...39,0
3	В25	15	380	1000	730	215	—	49,6...62,4
4	В25	15	380	1000	730	215	—	68,9...77,8

Табл. 3. Расход материалов на 1 м<sup>2</sup> плиты

№ п/п	Класс бетона	Толщина плиты, мм	Расход материалов, кг					
			Цемент	Щебень	Песок	Вода	Арматура	Фибра
1	B22,5	200	74	200	150	42	16,4	—
2	B25	200	76	200	146	43	6,1	6,2...7,8
3	B25	250	95	250	182	54	—	12,4...15,6
4	B25	180	68	180	131	39	—	12,4...14,0

Сопоставительный расчет технико-экономической эффективности предлагаемых вариантов конструкции плиты пола, выполненный с учетом текущих цен на материалы и полуфабрикаты, стоимости арматурных работ, приготовления смесей и формования конструкции, показал, что наиболее перспективным является состав сталефибробетона № 4, при использовании которого снижение себестоимости 1 м<sup>2</sup> плиты составляет более 20 %. При этом введение стальной фибры в верхний слой конструкции способствует снижению истираемости покрытия.

Сопrotивление истиранию определялось на образцах размером 7×7×7 см, которые подвергались испытанию на машине ЛКИ-3. Учитывая стесненность условий при распределении фибр в форме в процессе укладки и уплотнения смеси, а также разнородность материалов, составляющих композит, в стандартную методику внесены следующие изменения:

1. Критерием истираемости являлась не масса, а толщина слоя, на которую уменьшился образец в процессе истирания. Таким образом, величина истираемости определялась по формуле

$$H = \frac{\Delta h}{S},$$

где  $\Delta h$  — толщина слоя ( $h_{\text{нач}} - h_{\text{к}}$ ), см;  $S$  — площадь истираемой поверхности образца, см<sup>2</sup>.

2. За начальную принималась высота образца  $h_{\text{нач}}$  после обнажения на истираемой грани фибр.

Результаты испытания образцов свидетельствуют о том, что по показателю сопротивления истиранию сталефибробетон состава № 4 в 2,6 раза превосходит неармированный бетон.

Известно, что по сравнению с ленточными применение свайных фундаментов позволяет снизить стоимость работ до 30 %. Изготовление свай и их забивку можно вести круглогодично без снижения темпов работ в зимних условиях. Однако отмеченный экономический эффект часто не достигается из-за многочисленных случаев преждевременного разрушения голов, а иногда и стволов железобетонных свай, в результате чего они не могут быть погружены до проектных отметок, что приводит к снижению расчетных сопротивлений и надежности свайных фундаментов. Опыт работы с забивными сваями в Санкт-Петербурге показывает, что при их погружении в тяжелые и средние грунты около 30 % железобетонных свай не достигают проектных отметок и более чем у 80 % свай приходится срезать головы и стволы перед устройством ростверка, что приводит к безвозвратным потерям энергии и материалов.

На основании проведенных исследований ЗАО «Экспериментальный завод» (С.-Петербург) разработана промышленная технология и организовано первое в России производство сталефибробетонных свай на технологической линии, включающей станок для резки и профилирования фибр из проволоки, смеситель принудительного действия, в котором сначала приготавливается бетонная смесь, а затем вводится фибра, стальные термоформы, виброплощадку, а также вспомогательное и транспортное оборудования [11].

Разработанная технология и оборудование позволяют в заводских условиях изготавливать различные варианты забивных свай, из которых наибольшее распространение получили сталефибробетонные и комбинированно армированные (фиброжелезобетонные) сваи с предварительно изготовленными головами. По данному способу предварительно изготовленная сталефибробетонная голова как закладная деталь приформовывается к железобетонному или сталефибробетонному стволу и соединяется с ним при помощи петли или выпуска арматуры.

Десятки тысяч изготовленных ЗАО «Экспериментальный завод» свай с применением сталефибробетона прошли широкую проверку в условиях реального строительства, в результате которой установлено, что они обладают высокой ударостойкостью, обеспечивающей бездефектное погружение до проектных отметок и возможность отказа от применения свай-дублеров. Новые сваи можно забивать на одинаковую глубину, что позволяет избежать срезки стволов перед устройством ростверка. Способность к восприятию значительной энергии удара сокращает время погружения свай до 50 %, повышает возможности сваебойного оборудования и производительность сваебойных работ.

#### Библиографический список

1. *Пухаренко Ю.В.* Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов : автореф. дисс. ... док. техн. наук. СПб., 2004. 46 с.
2. *Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Гурашкин Ю.А.* Ударостойкость фибробетонов, армированных низкомолекулярными синтетическими волокнами // Технологии и долговечность дисперсно-армированных бетонов. Л. : ЛенЗНИИЭП, 1984. С. 92—96.
3. *Рабинович Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции: М. : Изд-во АСВ, 2004. 560 с.
4. *Tefaruk Haktanir, Kamuran Ari, Fatih Altun, Cengiz D. Atis, Okan Karahan.* Effects of steel fibers and mineral filler on the water-tightness of concrete pipes. *Cement & Concrete Composites* 28, 2006, vol. 28, no. 9, pp. 811—816. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.06.002.
5. *Bhikshma V., Manjpal K.* Study on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing steel fibers. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*, 2012, 13 (2), pp. 155—164.
6. *Bhikshma V., Singh J.L.* Investigations on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing steel fibers. *Indian Concrete Institute Journal*. 2010, 4—9 (10), pp. 15—19.
7. *Shah P.S., Rangan V.K.* Effect of fiber addition on concrete strength. *Indian Concrete Journal*. 1994, vol. 5, no. 2—6 (5), pp. 13—21.
8. *Rasheed M.H.F., Agha A.Z.S.* Analysis of Fibrous Reinforced Concrete Beams. *Engineering and Technical Journal*. 2012, 30 (6), pp. 974—987.



9. Морозов В.И., Опбул Э.К. Расчет прочности изгибаемых фиброжелезобетонных элементов с высокопрочной арматурой без предварительного напряжения // Докл. 62 научн. конф. СПб. : СПбГАСУ, 2005. Ч. 1. С. 210—214.

10. РТМ-17-01—2002. Руководящие технические материалы по проектированию и применению сталефибробетонных строительных конструкций. М., 2003.

11. Родов Г.С., Лейкин Б.В., Стерин В.С. Опыт применения стальных фибр диаметром 2 мм и фибр из отработанных тросов для производства забивных свай : Экспресс-информ // Строит. в районах Урала и Зап. Сибири СССР. Серия: Совершенствование базы строительства / ЦБНТИ. 1987. Вып. 1. С. 31—33.

*Поступила в редакцию в январе 2014 г.*

Об авторах: **Морозов Валерий Иванович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, член-корреспондент РААСН, **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»)**, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, gbk@spbgasu.ru;

**Пухаренко Юрий Владимирович** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительных материалов и метрологии, советник РААСН, **Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»)**, 190005, г. Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, tsik@spbgasu.ru.

Для цитирования: *Морозов В.И., Пухаренко Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях // Вестник МГСУ. 2014. № 3. С. 189—196.*

**V.I. Morozov, Yu.V. Pukhareenko**

#### **EFFICIENCY OF FIBER REINFORCED CONCRETE APPLICATION IN STRUCTURES SUBJECTED TO DYNAMIC EFFECTS**

Fiber reinforced concretes possess high strength under dynamic loadings, which include impact loads, thanks to their high structural viscosity. This is the reason for using them in difficult operating conditions, where increasing the performance characteristics and the structure durability is of prime importance, and the issues of the cost become less significant. Applying methods of disperse reinforcement is most challenging in case of subtle high-porous materials on mineral binders, for example foamed concrete. At the same time, the experiments conducted in Russia and abroad show, that also in other cases the concrete strength resistance several times increases as a result of disperse reinforcement. This doesn't depend on average density of the concrete and type of fiber used.

In the article the fibre reinforced concrete impact resistance is analysed. Recommendations are given in regard to fibre concrete application in manufacture of monolithic floor units for industrial buildings and precast piles.

**Key words:** fiber, concrete, fiber concrete, concrete structure, shock resistance of concrete, dynamic impact.

#### **References**

1. Pukhareenko Yu.V. *Nauchnye i prakticheskie osnovy formirovaniya struktury i svoystv fibrobetonov: avtoreferat dissertatsii doktora tekhnicheskikh nauk* [Scientific and Practical Fundamentals of Fiber Concrete Structure and Properties. Thesis Abstract of the Doctor of Technical Sciences]. Saint Petersburg, 2004, 46 p.

2. Lobanov I.A., Pukhareenko Yu.V., Gurashkin Yu.A. *Udarostoykost' fibrobetonov, armirovannykh nizkomodul'nymi sinteticheskimi voloknami* [Shock Resistance of Fiber Con-

cretes, Reinforced by Low-modulus Synthetic Fibers]. *Tekhnologiya i dolgovechnost' dispersno-armirovannykh betonov* [Technology and Durability of Fiber Reinforced Concretes]. Leningrad, LenZNIIEP Publ., 1984, pp. 92—96.

3. Rabinovich F.N. *Kompozity na osnove dispersno-armirovannykh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tekhnologii, konstruksii* [Composites Based on Fibre Reinforced Concretes. Problems of Theory and Design, Technologies, Structures]. Moscow, ASV Publ., 2004, 560 p.

4. Tefaruk Haktanir, Kamuran Ari, Fatih Altun, Cengiz D. Atis, Okan Karahan. Effects of Steel Fibers and Mineral Filler on the Water-tightness of Concrete Pipes. *Cement and Concrete Composites*. 2006, vol. 28, no. 9, pp. 811—816. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2006.06.002.

5. Bhikshma V., Manipal K. Study on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Containing Steel Fibers. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 2012, vol. 13, no. 2, pp. 155—164.

6. Bhikshma V., Singh J.L. Investigations on Mechanical Properties of Recycled Aggregate Concrete Containing Steel Fibers. *Indian Concrete Institute Journal*. 2010, no. 4—9 (10), pp. 15—19.

7. Shah P.S., Rangan V.K. Effect of Fiber Addition on Concrete Strength. *Indian Concrete Journal*. 1994, vol. 5, no. 2—6, pp. 13—21.

8. Rasheed M.H.F., Agha A.Z.S. Analysis of Fibrous Reinforced Concrete Beams. *Engineering and Technical Journal*. 2012, no. 30 (6), pp. 974—987.

9. Morozov V.I., Opbul E.K. Raschet prochnosti izgibaemykh fibrozhelezobetonnykh elementov s vysokoprochnoy armaturoy bez predvaritel'nogo napryazheniya [Strength Calculation of Bending Fiber Reinforced Concrete Elements with High-strength Reinforcement without Preliminary Strain]. *Doklad 62 nauchnoy konferentsii* [Report of the 62nd Scientific Conference]. Saint Petersburg, SPbGASU Publ., 2005, Part 1, pp. 210—214.

10. *RTM-17-01—2002. Rukovodyashchie tekhnicheskie materialy po proektirovaniyu i primeneniyu stalefibrobetonnykh stroitel'nykh konstruksiy* [RTM-17-01—2002. Technical Guides on Designing and Calculating Steel Fiber Reinforced Concrete Building Structures]. Moscow, 2003.

11. Rodov G.S., Leykin B.V., Sterin V.S. Opyt primeneniya stal'nykh fibr diametrom 2 mm i fibr iz otrabotannykh trosov dlya proizvodstva zabivnykh svay: Ekspres-inform [Experience of Using Steel Fibers of 2 mm Diameter and Fibers Made of Used Wires for Producing Drive Piles: Express-Inform]. *Stroitel'stvo v rayonakh Urala i Zapadnyy Sibiri SSSR. Seriya: Sovershenstvovanie bazy stroitel'stva* [Construction in the Regions of South Ural and Western Siberia of the USSR]. TsBNTI Publ. 1987, no. 1, pp. 31—33.

About the authors: **Morozov Valeriy Ivanovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, head, Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, corresponding member of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**, 4, 2 Krasnoarmeiskaya St., 190005, St. Petersburg, Russian Federation; gbk@spbgasu.ru;

**Pukharenko Yuriy Vladimirovich** — Doctor of Technical Sciences, Professor, head, Department of Building Materials Technology and Metrology, councilor of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, **Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU)**, 4, 2 Krasnoarmeiskaya St., 190005, St. Petersburg, Russian Federation; tsik@spbgasu.ru.

For citation: Morozov V.I., Pukharenko Yu.V. Effektivnost' primeneniya fibrobetona v konstruksiyakh pri dinamicheskikh vozdeystviyakh [Efficiency of Fiber Reinforced Concrete Application in Structures Subjected to Dynamic Effects]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 3, pp. 189—196.