

Гиль Артур Иванович, аспирант, Полоцкий государственный университет,
г. Новополоцк (Беларусь)

Лазовский Егор Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент, Полоцкий
государственный университет, г. Новополоцк (Беларусь)

Arthur Hil, Postgraduate Student, Polotsk State University,
Novopolotsk (Belarus)

Yahor Lazouski, PhD in Engineering Science, Associate Professor, Polotsk
State University, Novopolotsk (Belarus)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРЫ

EXPERIMENTAL STUDY OF MECHANICAL PROPERTIES OF FIBERGLASS REINFORCEMENT

АННОТАЦИЯ

Представленные экспериментальные исследования сосредоточены на определении механических характеристик стеклопластиковых арматурных стержней заявленным диаметром 8, 10 и 12 мм, произведенных в Республике Беларусь. Исследования проведены на двух сериях опытных образцов, отличающихся внутренней поверхностью испытательных муфт для закрепления испытуемых стержней в разрывной машине. Испытания проведены согласно ГОСТ 32492–2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик». Кроме разрушающей нагрузки, в процессе испытаний определялись относительные деформации индикаторами часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 100 мм. С целью поиска более экономичного варианта испытания арматуры были изготовлены и испытаны два опытных образца, отличающихся от основной серии геометрическими

параметрами испытательных муфт, что после анализа результатов испытаний позволило изготовить более экономичный вариант муфт для испытаний. Испытания третьей серии муфт позволили достичь экономии стали и эпоксидного клея на 30 и 45% соответственно. В данной статье описан характер разрушения стеклопластиковых стержней, особенности работы вплоть до хрупкого разрушения, построены диаграммы деформирования арматуры, которые подтверждают линейное деформирование композита. По результатам эксперимента представлены количественные значения прочности при растяжении, модуля упругости и относительного удлинения стержня при разрыве, сделаны выводы о влиянии площади поперечного сечения стержня на данные характеристики. На основании полученных результатов выявлены характерные особенности и главные недостатки стеклопластиковой арматуры белорусского производства, сделаны выводы о рациональности применения таких арматурных стержней в железобетонных изгибаемых элементах, в частности, в составе гибридного армирования (т.е. совместно с металлической арматурой).

ABSTRACT

Experimental studies are focused on determining the mechanical characteristics of the FRP reinforcing bar of the stated diameter 8, 10 and 12 mm, produced in the Republic of Belarus. Investigations were carried out on two series of samples, wherein the inner surface of the test couplings to hold test bars in a tensile testing machine. The test has been carried out according to GOST 32492–2015 “Composite polymer Reinforcement for reinforcement concrete structures. Methods of determination of physical-mechanical characteristics”. In addition to the failure load during the tests was determined relative strain gauges with divisions of 0.01 mm to 100 mm. With the aim of finding more economical version of the test, fittings were manufactured and tested two prototypes that differ from the basic series geometric parameters of the test couplings that, after the analysis of the test results enabled to produce more economical option couplings for testing. Tests of the third series of couplers has enabled savings of steel and epoxy adhesive 30 and 45%, respectively. This

article describes the fracture behavior of glass-plastic rods, features the work of up to brittle fracture diagrams of the deformation of the reinforcement, which confirm the linear deformation of the composite. The results of the experiment presented quantitative values of tensile strength, modulus and elongation at break rod, conclusions about the impact of the cross-sectional area of the rod on these characteristics. On the basis of the results obtained revealed the characteristic features and the major disadvantages of fiberglass reinforcement of the Belarusian production, conclusions about the rationality of the use of such reinforcing bars in reinforced concrete bending elements, in particular in the hybrid reinforcement (i.e., in conjunction with metal reinforcement).

Ключевые слова: композит, прочность при растяжении, модуль упругости, характер разрушения при разрыве, испытательная муфта.

Keywords: composite, tensile strength, elastic modulus, fracture properties at break, test couplings.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в строительной отрасли все активнее внедряется неметаллическая арматура, а именно композитная арматура, представляющая собой полимер, армированный стеклянным, базальтовым, карбоновым (углеродным) либо арамидным волокном (англ. *FRP*—*fiber reinforced polymer*). Все больше ученых как за рубежом, так и в нашей стране все активнее ведут исследования в данной области [1, 2].

Одним из основных вопросов применения композитной арматуры в железобетонных конструкциях является определение ее физико-механических характеристик, а именно прочности при растяжении, модуля упругости и относительного удлинения при разрушающей нагрузке. В отличие от металлической арматуры, испытания на растяжение композитной арматуры связаны с определенными трудностями. На сегодняшний день основным нормативным документом для испытания композитных стержней принят ГОСТ 32492–2015 «Арматура композитная полимерная для

армирования бетонных конструкций». Основная проблема при определении механических характеристик такого вида арматуры связана со способом закрепления испытуемого стержня в захватах разрывной машины. Для испытания не могут быть использованы захваты, применяемые для испытаний металлических стержней, поскольку при использовании стандартных захватов (металлических губок или зажимов) и приложении усилия обжатия в композитном стержне возникают концентраторы напряжений в зоне контакта, стержень теряет свою целостность, полимерная обойма растрескивается, и происходит проскальзывание либо разрыв волокон.

Целью данной работы является экспериментальное определение механических характеристик стеклопластиковой арматуры согласно ГОСТ 32492–2015, а также поиск более экономичного варианта применения испытательных муфт.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исследуемой арматуры была принята стеклопластиковая арматура, произведенная в Республике Беларусь. Заявленная прочность при растяжении не менее 1000 МПа зависит от диаметра арматуры. Для исследования основных физико-механических характеристик выбрана методика по ГОСТ 32492–2015, согласно которому можно определить следующее: предел прочности при растяжении, предел упругости, относительное удлинение при разрушающей нагрузке. Согласно ГОСТу, рекомендуемая конструкция представляет собой две испытательные металлические муфты, заполненные эпоксидным клеем. Вид типового опытного образца представлен на рисунке 1.

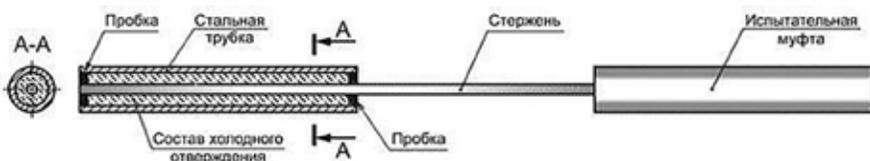


Рисунок 1. Вид типового опытного образца согласно ГОСТ 32492–2015

Для испытаний была выбрана стеклопластиковая арматура следующих заявленных диаметров: 8 мм, 10 мм и 12 мм. Периодический профиль арматуре придан при помощи навивки оплеточной стеклопластиковой нити (рисунок 2).

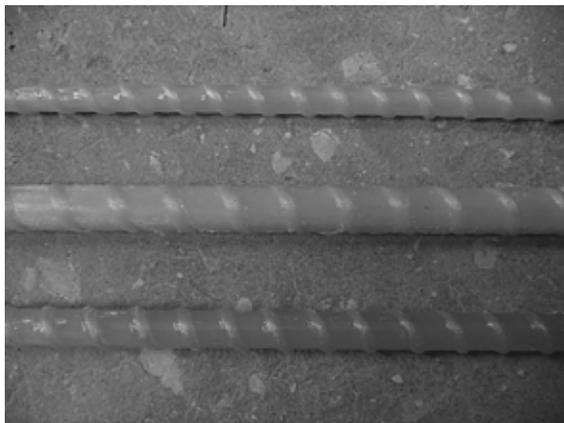


Рисунок 2. Общий вид стеклопластиковых стержней

Для экспериментальных исследований были изготовлены испытательные муфты двух основных серий, а также двух опытных серий. Муфты первой серии представляли собой отрезки длиной 300 мм бесшовной металлической трубки внешним диаметром 33 мм, толщиной стенки 3,5 мм. Для исключения проскальзывания эпоксидной обоймы внутри тела муфты, для увеличения сцепления с внутренней стороны была нарезана метрическая резьба шагом 3 мм, глубиной 0,75мм. Муфты второй серии отличались лишь отсутствием внутренней резьбы.

Вместе с основной программой исследования для поиска наиболее экономичного варианта применения муфт было изготовлено 2 опытных образца с укороченными муфтами. Первый опытный образец представлял собой муфту внешним диаметром 27 мм, длиной 210 мм с толщиной стенки 3 мм, без внутренней резьбы, с данным видом муфт испытывался стержень заявленным диаметром 8 мм. Во втором опытном образце применялась муфта диаметром 33 мм, длиной 180 мм, толщиной стенки 3,5 мм, с внутренней резьбой, испытуемый стержень заявленным диаметром

10 мм. Предполагаемая экономия эпоксидного клея 55 и 40% соответственно.

После проведенных испытаний опытных образцов и предварительного анализа полученных результатов была изготовлена третья серия образцов. Основное преимущества серии – экономия 55% эпоксидного клея по отношению к серии 1 и 2. Испытательные муфты третьей серии представляли собой отрезки бесшовной металлической трубки длиной 300 мм, внешним диаметром 27 мм, толщиной стенки 3 мм.

В качестве эпоксидного клея был применен фирменный высокопрочный двухкомпонентный тиксотропный эпоксидный клей Sikadur®-31 CF Normal. Данный клей был выбран благодаря его высоким механическим характеристикам: прочность на растяжение (согласно ISO 527) заявленная производителем 18–24 МПа, модуль упругости 5000 МПа, растяжимость при разрушении 0,4–0,1%, клей не дает усадки при твердении. Перед заполнением муфт клеем они были очищены от грязи и пыли, обезжирены растворителем. Для исключения вытекания клея в муфтах были предусмотрены пенополистирольные пробки.

Длина исследуемых стеклопластиковых стержней (длина между муфтами) серии 1–3 составляла 290 мм, отдельных опытных образцов 370 мм и 420 мм соответственно. Отверждение смолы 7 дней при средней температуре +20 °С. Общий вид экспериментальных образцов представлен на рисунке 3.

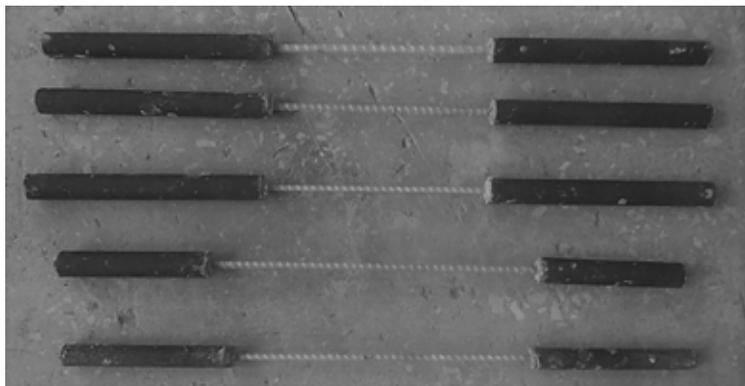


Рисунок 3. Общий вид экспериментальных образцов

Испытания производились на разрывной машине Р-50. Для определения относительных деформаций на образцах первой и второй серии были установлены 2 индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм на базе 100 мм. Нагрузка на образцы прикладывалась этапами по 5 кН. Общий вид испытываемого образца с установленными приборами представлен на рисунке 4.

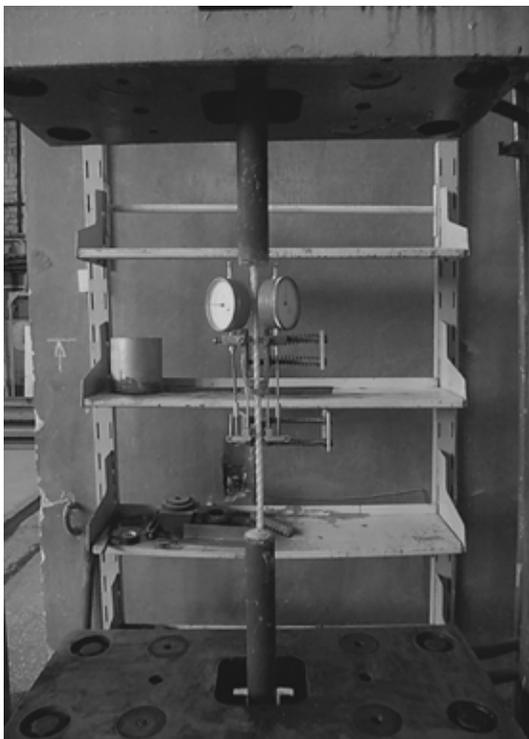


Рисунок 4. Общий вид образца с установленными приборами

ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ОБРАЗЦОВ

Образцы серии 1 и 2 имели следующий характер разрушения: под действием растягивающего усилия полимерная матрица потеряла свою целостность, и стеклянные волокна начинали отделяться друг от друга, нарушалась их совместная работа, что в конечном

итоге приводило к последовательному разрыву отдельных волокон и образца в целом, процесс разрыва происходил мгновенно, без видимых предпосылок, что характерно для хрупкого разрушения. Следует отметить, что в процессе нагружения образца периодически были слышны потрескивания, что скорее всего говорит о нарушении целостности полимерной матрицы. Стоит обратить особое внимание на тот факт, что у всех образцов серии 1 и 2 разрыв происходил в непосредственной близости от конца муфты (рисунок 5).



Рисунок 5. Общий вид стержня после испытания

Согласно ГОСТу, результаты таких испытаний не могут считаться положительными, и требуется проведение повторных исследований образцов. Однако в исследованиях Norris J.F. [3] показано, что средний предел прочности на разрыв при растяжении образцов, разрушающихся у кромки испытательной муфты, такой же, как и у образцов, разрушенных в пределах центральной части стержня. Таким образом, исследования Norris J.F. позволяют предположить, что существенного влияния в определении

предела прочности при растяжении стеклопластиковой арматуры место разрыва не оказывает, и таким образом результаты настоящих исследований могут использоваться для анализа механических характеристик арматуры.

Отдельно следует остановиться на характере разрушения опытных образцов. В опытном образце 2 после достижения прочности в 869,9 МПа, произошла срезка навивки (стеклопластиковой оплетки, предающей периодический профиль стержню), что отчетливо видно на рисунке 6.



Рисунок 6. Характерное отслоение оплеточной нити от тела стержня

Практически аналогичная ситуация наблюдалась у опытного образца 1 (при достижении усилия 1100 МПа оплеточная нить отклеилась от основного тела стержня, оплетка осталась в муфте, а стержень начал проскальзывать). По результатам исследования опытных образцов можно сделать вывод о том, что длина муфт для определения прочности на растяжения стеклопластиковых стержней заявленных диаметров 8, 10 и 12 мм играет важную роль и должна быть не менее 300 мм; вместе с тем выводится предположение, что диаметр муфты может быть уменьшен, т.к. в муфте диаметром 27 мм не происходило разрушения либо происходили нарушения сцепления эпоксидного клея и муфты. Таким образом, как было отмечено выше, для уменьшения материалоемкости при испытаниях композитных стержней была изготовлена третья серия образцов.

Характер разрушения образцов третьей серии аналогичен характеру разрушения образцов первой и второй серии, разрыв стержня происходил у края испытательной муфты. Проскальзывание, нарушение сцепления либо отслоение эпоксидного клея от тела муфты не происходило ни в одном из образцов. Применение испытательных металлических муфт внешним диаметром 27 мм и толщиной стенки 3 мм для определения механических характеристик стеклопластиковой арматуры диаметрами 8, 10 и 12 мм позволяют экономить 45% эпоксидного клея и 30% металла. При этом существенной разницы в количественных показателях механических характеристик арматуры не наблюдается.

Также стоит отметить, что наличие внутренней резьбы на испытательной муфте никак не повлияло на результаты испытаний, и можно сделать вывод о нецелесообразности ее нарезки.

Как было отмечено в исследованиях [4, 5], а также выяснено в настоящих испытаниях – стеклопластиковая арматура не имеет площадки текучести и работает линейно вплоть до хрупкого разрушения. Этот факт отчетливо виден на диаграмме деформирования стеклопластиковой арматуры разных диаметров (рисунок 7).

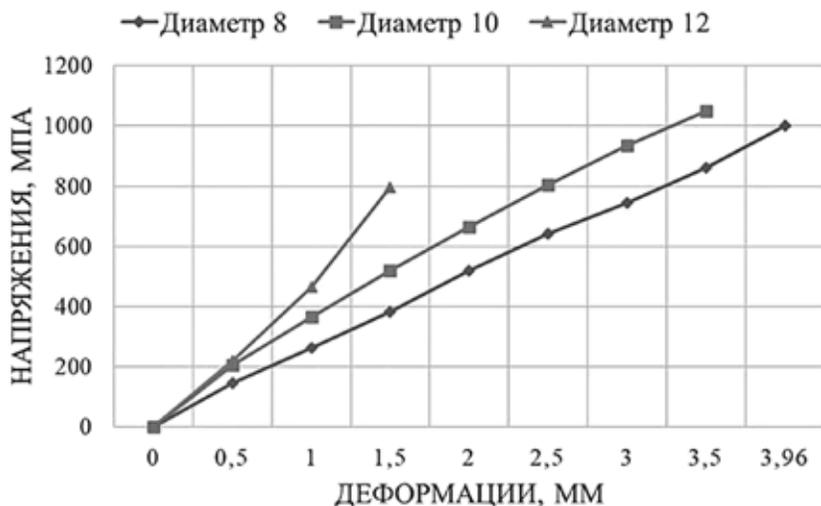


Рисунок 7. Диаграмма деформирования стеклопластиковой арматуры

Из анализа приведенного графика очевидно, что все образцы независимо от диаметра деформируются линейно вплоть до разрыва. Также стоит заметить, что напряжения при разрыве стержней значительно зависят от плотности волокон в матрице, т.е. от процентного содержания волокна в полимерной матрице. На этот факт стоит обращать отдельное внимание, т.к. зачастую у разных производителей стержни больших диаметров (12–16 мм) имеют более низкую прочность, нежели стержни малых диаметров (6–8 мм), также может иметь место обратная ситуация.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

По результатам испытаний по методике ГОСТ 32492–2015 определялись следующие механические характеристики стеклопластиковой арматуры:

- предел прочности при растяжении, МПа;
- модуль упругости, МПа;
- относительные деформации, %.

Основные результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований

	Заявленный диаметр арматуры, мм	Площадь поперечного сечения стержня, мм ²	Испытательная муфта			Длина испытываемого стержня между муфтами, мм	Прочность при растяжении, $f_{гр}$, МПа	Модуль упругости, $E_{гр}$, ГПа	Относительное удлинение при разрыве, $\epsilon_{гр}$, %	
			Внешний диаметр, мм	Длина, мм	Толщина стенки, мм					Внутренняя резьба
Образец 1	8	40	33	300	3,5	да	290	1000	25,29	3,95
	10	66,67					290	1214,939	30,755	3,94
	12	94,34					290	1298,495	50,696	2,56
Образец 2	8	40	33	300	3,5	нет	290	1085	23,77	4,56
	10	66,67					290	1252,437	30,597	4,09
	12	94,34					290	1277,295	50,472	2,53

	Заявленный диаметр арматуры, мм	Площадь поперечного сечения стержня, мм ²	Испытательная муфта				Длина испытываемого стержня между муфтами, мм	Прочность при растяжении, $f_{гр}$ МПа	Модуль упругости, $E_{гр}$ ГПа	Относительное удлинение при разрыве, $\epsilon_{гр}$ %
			Внешний диаметр, мм	Длина, мм	Толщина стенки, мм	Внутренняя резьба				
Образец 3	8	40	27	300	3,0	нет	290	1125	24,527	4,59
	10	66,67					290	1274,936	44,892	2,84
	12	94,34					290	1218,995	48,372	2,52
Опытный образец 1	8	40	27	210	3,0	нет	370	1100*	—	—
Опытный образец 2	10	66,67	33	180	3,2	да	420	869,957*	—	—

* – разрыв стержня отсутствовал

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что площадь поперечного сечения стеклопластиковой арматуры играет существенную роль в значениях механических характеристик при растяжении. В случае с арматурой, произведенной в Республике Беларусь, можно говорить о том, что напряжения при разрыве стержней тем выше, чем больше процент содержания стеклянного волокна в полимерной матрице, хотя стоит обратить внимание на то, что прочность стержней заявленным диаметром 10 и 12 мм практически совпадает.

Отдельно стоит остановиться на относительном удлинении стеклопластикового стержня при разрыве, этот показатель изменяется от 2,5 до 4,5% и во многом зависит от диаметра стержня. Таким образом, наименьшее удлинение у стержней больших заявленных диаметров. Для сравнения, относительное удлинение у стали в среднем 25%. Эти показатели говорят прежде всего о том, что применение стеклопластиковой арматуры может быть эффективно в сочетании со стальной арматурой либо в предварительно напряженных конструкциях.

Анализируя полученные механические характеристики, стоит обратить внимание на достаточно большую разбежку в значениях модуля упругости, от 23 до 51 МПа. На этот факт стоит обращать особое внимание при расчете строительных железобетонных конструкций с композитной арматурой при расчетах по деформационной модели и в любом случае определять реальный модуль упругости для применяемой арматуры каждой партии и производителя. Полученные значения модуля упругости подтверждают один из основных недостатков стеклопластиковой арматуры, который в настоящее время является основной трудностью в применении такого вида армирования в железобетонных изгибаемых элементах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные экспериментальные исследования позволяют в дальнейшем более экономично проводить испытания стеклопластиковой арматуры для определения механических характеристик. При использовании испытательных муфт меньшего внешнего диаметра возможна экономия металла на 30% и экономия эпоксидного клея на 45%.

Проанализировав полученные результаты экспериментальных исследований, можно сделать однозначный вывод о том, что исследуемую арматуру в настоящее время целесообразно применять в предварительно напряженных конструкциях либо в сочетании со стальной, то и другое направление требуют дальнейших исследований. На наш взгляд, на сегодняшний день более перспективным является направление комбинированного (гибридного) армирования, так как вопросы предварительного напряжения композитных стержней требуют детальной разработки анкерующих устройств, технологии натяжения и ряда других.

Исследуемая стеклопластиковая арматура, а вместе с тем и ее полученные количественные механические характеристики будут в дальнейшем применены при исследовании изгибаемых железобетонных элементов с гибридным армированием, т.е. совместно со стеклопластиковой арматурой будут использованы

металлические стержни. Применение такого вида армирования в изгибаемом железобетонном элементе в перспективе должно позволить более рационально использовать прочностные свойства и преимущества стеклопластиковой арматуры.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Тур, В. В. Экспериментальные исследования изгибаемых бетонных элементов с комбинированным армированием стальными и стеклопластиковыми стержнями / В. В. Тур, В. В. Малыха // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Серия F Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 8. – С. 58–65.
2. Лешкевич, О. Н. Перспективы применения композитной арматуры // О. Н. Лешкевич // Третий междунар. симп. «Проблемы современного бетона и железобетона», Минск, 9–11 ноября 2011, [Электронный ресурс], Режим доступа: <http://www.twirpx.com/file/664098/>. Дата доступа: 26.03.2015.
3. Норрис, Дж. Ф. Изучение характера разрушения стеклопластиков при кратковременном растяжении / Дж. Ф. Норрис // Материалы армированные волокном. Пер. с англ. канд. техн. наук Л. И. Сычевой, А. В. Воловика. – М.: Стройиздат, 1982. – С. 25–31.
4. Гиздагуллин, А. Р. Особенности испытаний и характер разрушения полимеркомпозитной арматуры / А. Р. Гиздагуллин, В. Г. Хозин, А. Н. Куклин, А. М. Хуснустдинов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 3. – С. 40–47.
5. Широко, А. В. Определение механических свойств композитной арматуры с учетом температурного воздействия / А. В. Широко, А. Н. Камлюк, А. В. Спиглазов, А. С. Дробыш // Механика машин, механизмов и материалов. – Минск: Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси. – 2015. – № 2 (31). – С. 59–65.

REFERENCES

1. Tur V.V., Malykha V. V. *Vestnik Polotskogo gos. un-ta. Seriya F. Stroitel'stvo. Prikladnye nauki*. 2013. No. 8. pp. 58–65.
2. Leshkevich, O. N. *Tretiy mezhdunar. simp. «Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona», Minsk, 9-11 noyabrya 2011.* [Electronic source], Access mode: <http://www.twirpx.com/file/664098/>. Access date: 26.03.2015.
3. Norris, Dzh. F. *Materialy armirovannye voloknom*. Moscow: Stroyizdat, 1982. pp. 25–31.
4. Gizdatullin A. R., Khozin V. G., Kuklin A. N., Khusnustdinov A. M. *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2014. No. 3. pp. 40–47.
5. Shirko A.V., Kamlyuk A. N., Spiglazov A. V., Drobysh A. S. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov*. 2015. No. 2. pp. 59–65.

Статья поступила в редколлегию 21.09.2017.