

Деркач Валерий Николаевич, д-р техн. наук, заместитель директора, филиал РУП «Институт БелНИИС» – «Научно-технический центр», г. Брест (Беларусь)

Демчук Ольга Григорьевна, аспирант, филиал РУП «Институт БелНИИС» – «Научно-технический центр», г. Брест (Беларусь)

Valery Derkach, DSc in Engineering Science, deputy director, Branch office of the RUE «Institute BelNIIS» – Scientific-Technical Center, Brest (Belarus)

Olga Demchuk, PhD student, Branch office of the RUE «Institute BelNIIS» – Scientific-Technical Center, Brest (Belarus)

ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАТИВНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ИЗ КРУПНОФОРМАТНЫХ КЛАДОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПЛОТНОГО СИЛИКАТНОГО БЕТОНА НА ПОЛИУРЕТАНОВЫХ ШВАХ

STRENGTH AND DEFORMABILITY IN COMPRESSION OF MASONRY FROM LARGE-SCALE SILICATE BLOCKS WITH POLYURETHANE JOINTS

АННОТАЦИЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований при сжатии образцов каменной кладки, из силикатных кладочных изделий на тонкослойных полиуретановых швах. На основании экспериментальных исследований выявлены особенности деформирования и разрушения опытных образцов, получены значения прочности каменной кладки при сжатии и ее деформационных характеристик. Выполнено сопоставление полученных результатов с результатами экспериментальных исследований каменной кладки из силикатных кладочных изделий на тонкослойных клеевых полимерцементных швах. Показано, что характер деформирования образцов кладки на полимерцементном клеевом растворе

и на клей-пене отличается. Модуль деформаций каменной кладки на клей-пене по мере повышения сжимающих напряжений увеличивается, что объясняется высокой податливостью горизонтальных полиуретановых швов на начальных этапах нагружения опытных образцов. По мере обжатия полиуретановых швов их деформативность снижается, но вплоть до достижения напряжений близких к прочности при сжатии кладки остается более высокой, чем полимерцементных клеевых швов. Установлено, что значение секущего модуля упругости каменной кладки на тонкослойных полимерцементных швах в 1,25 раза превышает значение модуля упругости кладки на клей-пене. Образование первых трещин в кладке на полиуретановых швах происходит при более низких значениях сжимающих напряжений, чем в кладке на полимерцементных клеевых швах, что объясняется большим поперечным расширением полиуретановых швов при сжатии по сравнению с полимерцементными клеевыми швами, а также неравномерностью передачи сжимающих напряжений на опорные поверхности кладочных изделий при полосовом заполнении полиуретановой клей-пенной горизонтальных швов кладки.

ABSTRACT

The results of experimental researches of masonry specimens from silicate blocks with thin-layer polyurethane joints have been presented. On the basis of experimental researches, features of deformation and failure of specimens, the strength of masonry in compression and its deformation characteristics have been obtained. The results have been compared with the results of experimental researches of masonry from silicate blocks with thin-layer polymer-cement joints. It is shown that the deformation behavior of the masonry specimens with polymer-cement joints and specimens with polyurethane joints differs. It is shown that the elastic modulus of masonry with polyurethane joints increases with increasing compressive stresses, which is explained by the high flexibility of horizontal polyurethane joints at the initial stages of loading of specimens. With increasing compression level in polyurethane joints their flexibility is reduced, but until reaching stresses close to the compressive strength of the masonry, it remains higher than in polymer-cement joints. It is established that the value of

the secant elastic modulus of masonry with polymer-cement joints is 1,25 times higher than the value of elastic modulus with polyurethane joints. Formation of the first cracks in the masonry joints on the polyurethane occurs at lower compressive stresses than in the masonry on the polymer-glue joints because of the large transverse extension polyurethane joints under compression compared to polymer-cements glue joints, and uneven transfer of compressive stresses on the bearing surfaces of masonry units with lane filling of horizontal joints by polyurethane adhesive-foam.

Ключевые слова: каменная кладка, изделия из плотного силикатного бетона, полиуретановый клей, прочность при сжатии, модуль деформаций, коэффициент Пуассона.

Keywords: masonry, silicate blocks, polyurethane joints, compression strength, elastic modulus, Poisson's ratio.

ВВЕДЕНИЕ

Национальная стратегия устойчивого социально-экономического развития Республики Беларусь на период до 2030 года в области строительства предусматривает возведение зданий и сооружений с обязательным использованием эффективных проектов, обеспечивающих снижение стоимости строительства объектов за счет снижения затрат на всех стадиях инвестиционно-строительного цикла и сокращения потребления ресурсов. Реализация данных требований возможна только при условии внедрения в строительную практику инновационных технологий строительного производства, применения новых эффективных строительных материалов.

Одной из инновационных технологий возведения зданий, которая получила развитие в последнее время, является технология, основанная на применении каменных кладок из кладочных изделий с точными геометрическими размерами на однокомпонентной полиуретановой клей-пене [1–4].

Применение таких кладок позволяет в два раза увеличить производительность труда по сравнению с традиционными методами выполнения кладочных работ, повысить теплотехническую

однородность стен, сократить затраты на транспортировку материалов, погрузочные работы и их хранение. Несмотря на очевидные преимущества кладок на полиуретановых швах, в настоящее время не накоплен достаточный опыт их применения в несущих стенах зданий. Сдерживающим фактором широкого внедрения полиуретановых клеев при возведении каменных конструкций является отсутствие нормативных документов, регламентирующих правила проектирования таких конструкций.

Указанные обстоятельства определили необходимость проведения комплексных исследований каменных кладок на полиуретановых швах с целью установления их прочностных и деформационных характеристик при различных видах напряженного состояния, которые были выполнены в филиале РУП «ИНСТИТУТ БелНИИС» – НТЦ.

ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ КЛАДКИ

Опытные образцы кладки выполнялись из пустотелых кладочных изделий из плотного силикатного бетона по ГОСТ 379-2015, размерами 248×200×248 мм производства СЗАО «КварцМелПром» (рисунок 1). По геометрическим показателям кладочные изделия относятся к группе 1 согласно ТКП EN 1996-1-1.

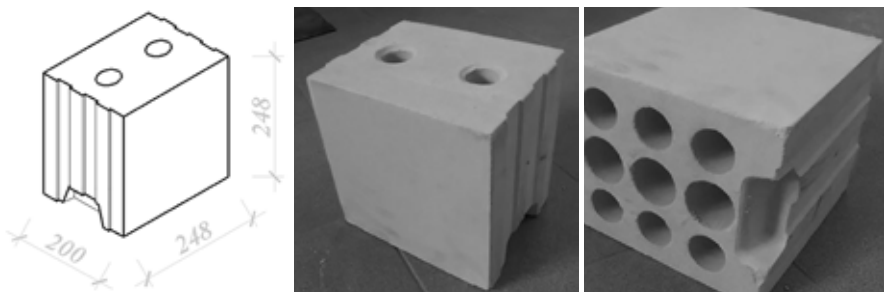


Рисунок 1. Кладочные изделия из плотного силикатного бетона производства СЗАО «КварцМелПром»

Среднее значение приведенной прочности кладочных изделий на сжатие f_b , установленное в соответствии с СТБ EN772–1, составило 22 МПа.

Кладка силикатных изделий производилась на однокомпонентную полиуретановую клей-пену торговой марки «KANZLER CEMENT» производства ООО «БелИНЭКО», которая наносилась двумя полосами на опорную поверхность кладочных изделий (рисунок 2). Общая ширина полос полиуретановой клей-пены после укладки кладочных изделий составляла 0,5–0,6 толщины последних. Соединение вертикальных швов осуществлялось по типу «паз-гребень» без заполнения полиуретановой смесью.

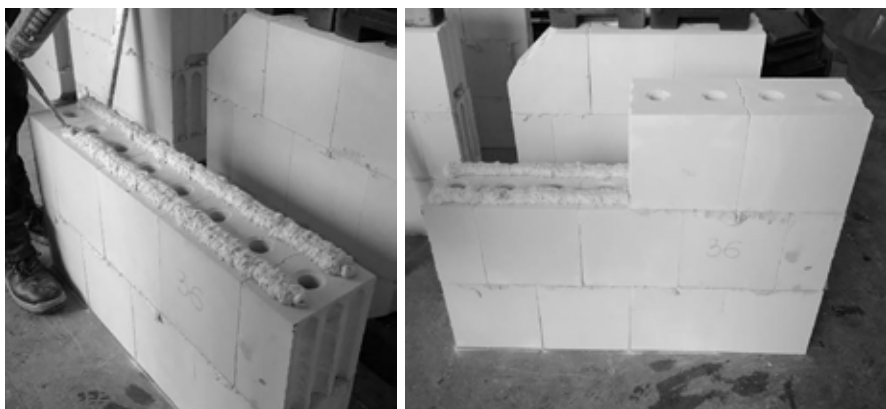


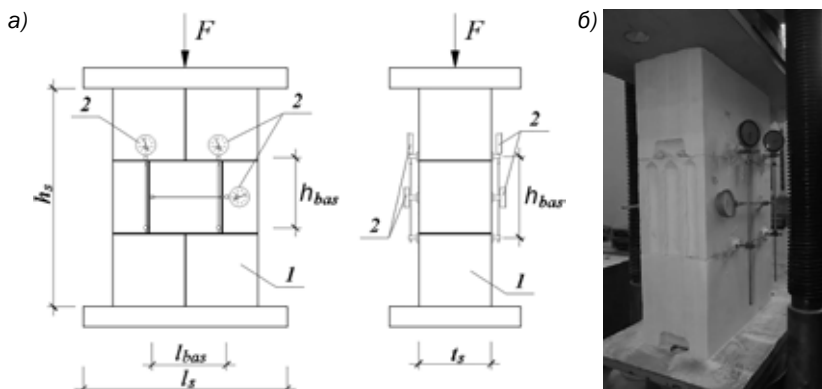
Рисунок 2. Изготовление опытных образцов каменной кладки

В соответствии с требованиями СТБ EN1052–1 было изготовлено три образца кладки на клей-пене. Для проведения сопоставительных испытаний дополнительно было изготовлено три образца кладки на полимерцементном клеевом растворе М100. Горизонтальные швы кладки указанных образцов полностью заполнялись раствором. Высота опытных образцов составляла $h_s=750$ мм, ширина $l_s=500$ мм, толщина $t_s=200$ мм. Сразу после изготовления к каждому испытываемому образцу прикладывали предварительную вертикальную равномерно распределенную сжимающую нагрузку таким образом, чтобы сжимающие напряжения в сечении образца достигали около $2,5 \cdot 10^{-3}$ МПа. В нагруженном состоянии образцы хранились в лабораторных условиях при температуре $+10^\circ\text{C}$ и влажности воздуха 60–70% в течении 7 суток.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИСПЫТАНИЙ

Сжимающая нагрузка на опытные образцы кладки передавалась при помощи пресса гидравлического П-125. Производилось первоначальное нагружение с целью контроля разницы показаний индикаторов, установленных на противоположных лицевых гранях образца, которая не должна была превышать 20%.

Усилие на образец передавалось равномерно, при этом скорость нагружения выбиралась такой, чтобы достичь разрушения образца в пределах 15–30 минут от начала приложения нагрузки. В ходе испытаний фиксировались нагрузка образования первых трещин и разрушающая нагрузка, а также определялись относительные деформации кладки в вертикальном и горизонтальном направлениях с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,001 мм, установленных с базами $h_{bas}=0,3h_s$ и $l_{bas}=0,5l_s$. Схема расстановки измерительных приборов и общий вид опытного образца показаны на рисунке 3.



1 – опытный образец; 2 – индикаторы перемещений часового типа с ценой деления 0,001 мм; h_s – высота образца; l_s – длина образца; t_s – толщина образца; h_{bas} , l_{bas} – базы измерения деформаций кладки; F – прилагаемая нагрузка

Рисунок 3. Схема испытаний опытных образцов каменной кладки (а); общий вид опытного образца в испытательной установке (б)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

При испытаниях образцов каменной кладки, выполненных с применением полиуретановой клей-пены, среднее значение нагрузки трещинообразования $F_{crс}$ составило 0,25 от средней разрушающей нагрузки F_{max} . Вертикальные трещины возникали в силикатных блоках на лицевых поверхностях опытных образцов. При повышении нагрузки происходило развитие трещин в вертикальном направлении по телу блоков, а также появление новых трещин как на лицевых, так и на боковых гранях образцов (рисунок 4а). Разрушение опытных образцов носило хрупкий характер и наступало вследствие раздавливания силикатных блоков, сопровождающегося разрывом кладки в поперечном направлении, при значениях сжимающих напряжений $f = 5,6-6,9$ МПа (рисунок 4б).

Образование первых трещин в образцах кладки на полимерцементных клеевых швах наблюдалось при среднем значении нагрузки $F_{crс} = 0,56 F_{max}$. С ростом испытательной нагрузки трещины развивались в вертикальном направлении аналогично образцам кладки на полиуретановых швах. Разрушение образцов кладки на полимерцементных швах происходило хрупко при значениях сжимающих напряжений $f = 7,2-8,2$ МПа.

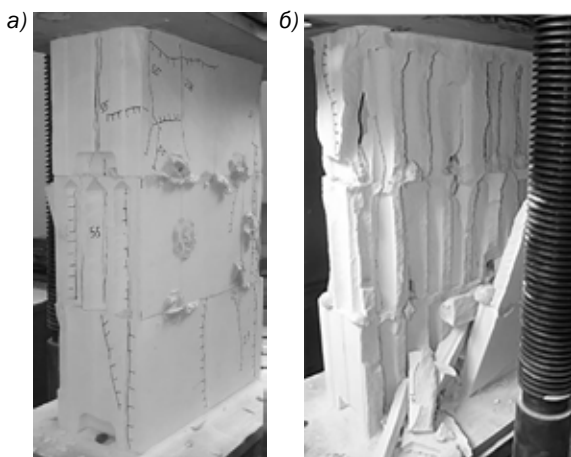


Рисунок 4. Характер трещинообразования (а) и разрушения (б) образцов кладки на полиуретановой клей-пене

Результаты определения прочности при сжатии каменной кладки приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты определения прочности при сжатии каменной кладки

№ образца	Сжимающие напряжения при образовании первой трещины σ_{cr0} (МПа)	Прочность при сжатии, f_i (МПа)	Характеристическое значение прочности при сжатии f_{ik} (МПа)
Кладка на полиуретановой клей-пене			
Сп1	0,8	6,9	5,8
Сп2	2,6	6,6	5,5
Сп3	1,2	5,6	4,7
Среднее значение	1,6	6,4	5,3
Кладка на полимерцементном клеевом растворе			
Сц1	3,2	7,8	6,5
Сц2	3,9	8,2	6,8
Сц3	3,8	7,2	6,0
Среднее значение	3,6	7,7	6,4

Из таблицы 1 следует, что характеристическое значение прочности при сжатии кладки на полимерцементных клеевых швах оказалось на 20% выше, чем кладки на полиуретановых швах. При этом необходимо отметить тот факт, что значения прочности кладки на полимерцементных клеевых швах определялось на образцах со сплошным заполнением раствором горизонтальных швов. В соответствии с ТКП EN1996–1–1 при полосовых горизонтальных растворных швах прочность кладки должна снижаться в зависимости от отношения общей ширины полос раствора к толщине кладки. Если учесть указанный фактор, то при одинаковой общей ширине полос цементных клеевых и полиуретановых швов прочность при сжатии, полученная для образцов кладки на полиуретановых швах, окажется близкой

к скорректированному значению прочности при сжатии кладки на клеевых цементных швах.

Образование первых трещин в кладке на полиуретановых швах происходило при более низких значениях сжимающих напряжений, чем в кладке на полимерцементных клеевых швах. Данный факт можно объяснить большим поперечным расширением полиуретановых швов при сжатии по сравнению с полимерцементными клеевыми швами, а также неравномерностью передачи сжимающих напряжений на опорные поверхности кладочных изделий при полосовом заполнении полиуретановой клей-пенной горизонтальных швов кладки.

Это обстоятельство следует принимать во внимание при назначении расчетного значения прочности при сжатии кладки на полиуретановой клей-пене путем применения повышенного по сравнению с традиционными видами кладок значения частного коэффициента для свойств материала.

Графики деформирования образцов каменной кладки при сжатии показаны на рисунке 5.

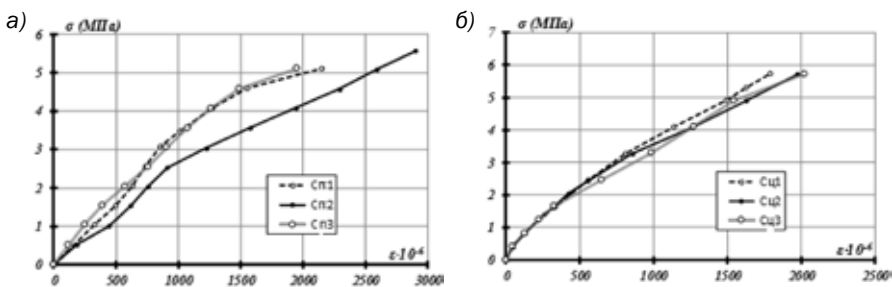


Рисунок 5. Графики деформирования образцов каменной кладки при сжатии: а) – кладка на полиуретановой клей-пене; б) – кладка на полимерцементных клеевых швах

Модуль упругости отдельного испытываемого образца кладки E_i определялся как секущий модуль по значению средней относительной деформации, полученной в четырех точках при нагрузке $F_i = 1/3F_{\max}$. При этой же нагрузке устанавливались значения коэффициента поперечных деформаций каменной кладки ν_{xy} . Значение коэффициента K_{Ei} , характеризующего упругие свойства

кладки, в соответствии с ТКП EN1996–1–1 принималось равным отношению E_i/f_{ik} .

Результаты определения деформационных характеристик каменной кладки приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты определения деформационных характеристик кладки

№ образца	Секущий модуль упругости E_i (МПа)	Коэффициент Пуассона ν_{xy}	K_E
Кладка на полиуретановой клей-пене			
Сп1	3400	0,30	590
Сп2	2700	0,27	490
Сп3	3700	0,34	790
Среднее значение	3300	0,30	600
Кладка на полимерцементном клеевом растворе			
Сц1	4400	0,15	670
Сц2	4100	0,14	600
Сц3	3800	0,10	640
Среднее значение	4100	0,13	650

Из таблицы 2 следует, что значение секущего модуля упругости каменной кладки на тонкослойных полимерцементных швах примерно на 25% превысило значение модуля упругости кладки на полиуретановой клей-пене, при этом значения коэффициента K_E обоих видов кладок были близки. Значение коэффициента Пуассона кладки на полимерцементных швах ν_{xy} , оказалось в 2,3 раза ниже значения ν_{xy} кладки на полиуретановых швах.

Анализ графиков деформирования показывает, что при повышении напряжений σ от 0 до $0,4f_k$ модуль упругости кладки на полиуретановых швах возрастает. При дальнейшем повышении

нагрузки значения E изменялись незначительно. Этот эффект объясняется высокой податливостью горизонтальных полиуретановых швов, которая снижалась по мере их обжатия. При напряжениях в кладке $\sigma \geq 0,6 f_k$ тангенсы углов наклона диаграмм деформирования кладок на полиуретановых и полимерцементных швах были близкими. Схожий характер деформирования имел место при испытаниях кладки из ячеистобетонных блоков на полиуретановых швах [5–8]. Значения относительных деформаций каменной кладки на полиуретановой клей-пене при уровнях напряжений $\sigma \approx f$ находились в диапазоне 0,002–0,0028, а кладки на полимерцементных клеевых швах в пределах 0,0018–0,002.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные значения сжимающих напряжений, при которых происходило образование трещин в каменной кладке из силикатных кладочных изделий на полимерцементных клеевых швах, в 2,3 раза превышали значения напряжений трещинообразования кладки на полиуретановых швах. При этом характеристическое значение прочности при сжатии кладки на полимерцементных клеевых швах (f_k) оказалось в 1,2 раза выше значения f_k кладки на полиуретановых швах.
2. Установленное экспериментально значение секущего модуля упругости каменной кладки на полиуретановых швах (E) в 1,25 раза ниже среднего значения (E) кладки на полимерцементных клеевых швах. Значение коэффициента поперечной деформации кладки на полиуретановых швах (ν_{xy}) при нагрузке $F=1/3F_{max}$ в 2,3 раза превысило среднее значения ν_{xy} кладки на полимерцементных клеевых швах.
3. Модуль деформаций каменной кладки из силикатных кладочных изделий на полиуретановых швах нелинейно возрастает по мере повышения сжимающих напряжений до значений $0,4 f_k$. При дальнейшем повышении нагрузки значения E изменялись незначительно. При значениях сжимающих напряжений $\sigma \geq 0,6 f_k$ модули деформаций

кладок на полиуретановых и полимерцементных клеевых швах были близки.

4. Повышенную деформативность кладки на полиуретановых швах при низких значениях сжимающих напряжений следует учитывать при численном расчете напряжений и деформаций как в поэтажно опертых стенах каркасных зданий, так и в несущих стенах зданий и узлах их сопряжений с ненесущими стенами и перегородками, а также принимать во внимание при выборе способов отделки стен и перегородок.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Глумов, А. Кладка на полиуретановых составах: как устранить мостики холода / А. Глумов // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. – 2014. – № 4. – С. 30–31.
2. Деркач, В. Н. Трещиностойкость каменных перегородок / В. Н. Деркач, Р. Б. Орлович // Жилищное строительство. – 2012. – № 8. – С. 34–37.
3. Jäger, A. Verklebung von Planziegelmauerwerk mit Polyurethanklebern [Соединение швов в каменной кладке с помощью полиуретановых клеев] / A. Jäger, C. Kuhlemann, E. Habian, M. Kasa, S. Lu // Mauerwerk. – 2011. – № 15. – S. 223–231.
4. Aldoghaim, E. Untersuchungen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Mauerwerk durch Elastomerlager [Исследования механических свойств каменных кладок на эластичных швах] / E. Aldoghaim // Mauerwerk. – 2012. – № 16. – S. 93–102.
5. Drobiec, L. Wpływ rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murów z ABK poddanych sciskaniu [Влияние вида раствора на механические характеристики кладки из АВК при сжатии] / L. Drobiec, R. Jasinski // Materiały Budowlane. – 2015. – № 4. – S. 3–7.
6. Гринфельд, Г. И. Сравнительные испытания кладки из автоклавного газобетона с различным исполнением

- кладочного шва / Г. И. Гринфельд, А. П. Харченко // Жилищное строительство. – 2013. – № 11. – С. 30–34.
7. Горшков, А. С. Свойства стеновых конструкций из ячеистобетонных изделий автоклавного твердения на полиуретановом клею / А. С. Горшков, Н. И. Ватин // Инженерно-строительный журнал. – 2013. – № 5. – С. 5–19.
8. Деркач, В. Н. Прочность и деформативность каменной кладки из ячеистобетонных блоков автоклавного твердения на полиуретановых швах. Часть 1. Прочность и деформативность при сжатии / В.Н. Деркач // Строительные материалы. – 2017. – № 5. – С. 29–33.

REFERENCES

1. Glumov A. *Stroitelnyye materialy, oborudovaniye i tekhnologii XXI veka*. 2014. No. 4. pp. 30–31 (rus).
2. Derkach V.N. *Zhilishchnoye stroitelstvo*. 2012. No. 8. pp. 34–37 (rus).
3. Jäger A., Kuhlemann C., Habian E., Kasa M., Lu S. Verklebung von Planziegelmauerwerk mit Polyurethanklebern. *Mauerwerk*. 2011. No. 15. pp. 223–231. (de)
4. Aldoghaim Ye. Untersuchungen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Mauerwerk durch Elastomerlager. *Mauerwerk*. 2012. No. 16. pp. 93–102. (de)
5. Drobiec L., Jasinski R. Wplyw rodzaju zaprawy na parametry mechaniczne murow z ABK poddanych sciskaniu. *Materialy Budowlane*. 2015. No. 4. pp. 3–7. (pl)
6. Grinfeld G.I., Kharchenko A.P. *Zhilishchnoye stroitelstvo*. 2013. No. 11. pp. 30–34 (rus).
7. Gorshkov A.S., Vatin N.I. *Magazine of Civil Engineering*. 2013. No. 5. pp. 5–19 (rus).
8. Derkach V. N. *Stroitelnyye materialy*. 2017. No. 5. pp. 29–33 (rus).

Статья поступила в редколлегию 19.11.2017.