

УЧЕТ АНИЗОТРОПИИ ПРОЧНОСТИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ОЦЕНКЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ИСТОРИЧЕСКИХ РАСПОРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

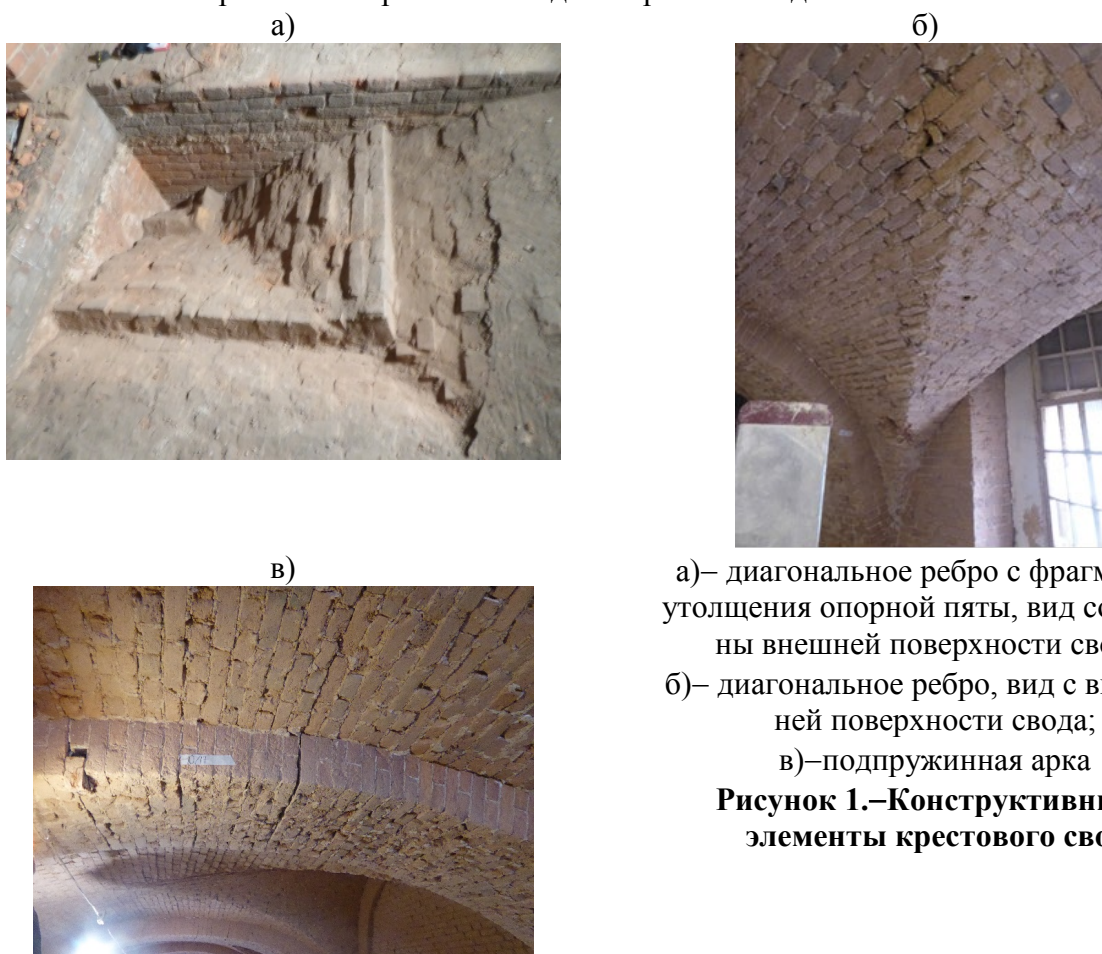
Галалюк А. В., Деркач В. Н.

Введение. Каменные распорные конструкции (арки и своды) впервые были применены римлянами и персами и в течении 2,5 тысяч лет выполняли функцию основных видов перекрытий в зданиях гражданской, культовой и оборонной архитектуры. Арки и своды являлись также главным эстетическим элементом в римской, византийской, романской, готической и ренессансной архитектуре. За многовековой период строительства архитекторами опытным путем были получены рациональные соотношения конструктивных элементов в распорных системах и достигнуто исключительное совершенство в использовании арок и сводов, как несущих каменных конструкций и архитектурных форм. Обследования исторических распорных систем выявляют многочисленные примеры деформированных конструкций, утративших часть вертикальных опор, подпружинных арок, связей или других элементов, которые не вписываются в теоретическую расчетную схему конструкции. Следовательно, исторические кирпичные арки и своды способны к частичным изменениям или полной перестройке начальной рабочей схемы за счет своих скрытых резервов [1].

Поэтому диагностика технического состояния и оценка несущей способности кирпичных распорных конструкций при обследовании исторических зданий является достаточно сложной задачей, адекватное решение которой возможно только при учете конструктивных особенностей арок и сводов и их совместной работы с вертикальными несущими конструкциями здания, а также анизотропии прочностных и деформационных характеристик каменной кладки.

Проверка предельного состояния несущей способности каменных распорных конструкций.

При действии эксплуатационной нагрузки или неравномерной осадке фундаментов здания геометрические формы каменных распорных конструкций, в частности кирпичных сводов, определяют направление возникающих в них силовых потоков под различными углами к растворным швам каменной кладки. В качестве примера на рисунке 1 приведен общий вид основных конструктивных элементов крестового кирпичного свода исторического здания.



а)– диагональное ребро с фрагментом утолщения опорной пяты, вид со стороны внешней поверхности свода;
б)– диагональное ребро, вид с внутренней поверхности свода;
в)–подпружинная арка
Рисунок 1.–Конструктивные элементы крестового свода

В настоящее время при выполнении поверочных расчетов напряжения и деформации в распорных каменных конструкциях, как правило, рассчитываются методом конечных элементов (МКЭ) с помощью инженерных программных комплексов [2-3]. Конечно элементный (КЭ) анализ позволяет исследовать механизмы изменения рабочей схемы сводов при их деформировании, учесть нарушения целостности каменной кладки в случае устройства различного рода отверстий для пропуска инженерных коммуникаций при реконструкции зданий, деградацию каменной кладки, вызванную неблагоприятными воздействиями внешней среды.

Задача может решаться как в плоской, так и объемной постановке. Каменная кладка обычно рассматривается, как однородный (однородный) материал, наделенный обобщенными деформационными характеристиками кладочных камней и раствора.

Исследования [4-6] показывают, что при расчете напряженно-деформированного состояния (НДС) распорной конструкции кладку из полнотелого керамического кирпича допускается представлять материалом с изотропными деформационными характеристиками. На основании расчетов МКЭ устанавливаются значения и траектории действия главных напряжений в каменной кладке.

На рисунке 2 показаны траектории главных сжимающих и растягивающих напряжений в кирпичном крестовом своде при действии вертикальной равномерно-распределенной нагрузки. Анализ НДС свода показывает, что силовой поток главных сжимающих напряжений концентрируется вдоль диагоналей свода, т.е. в местах пересечения распалубок, при этом их траектории направлены под углом примерно 45° к горизонтальным растворным швам кладки.

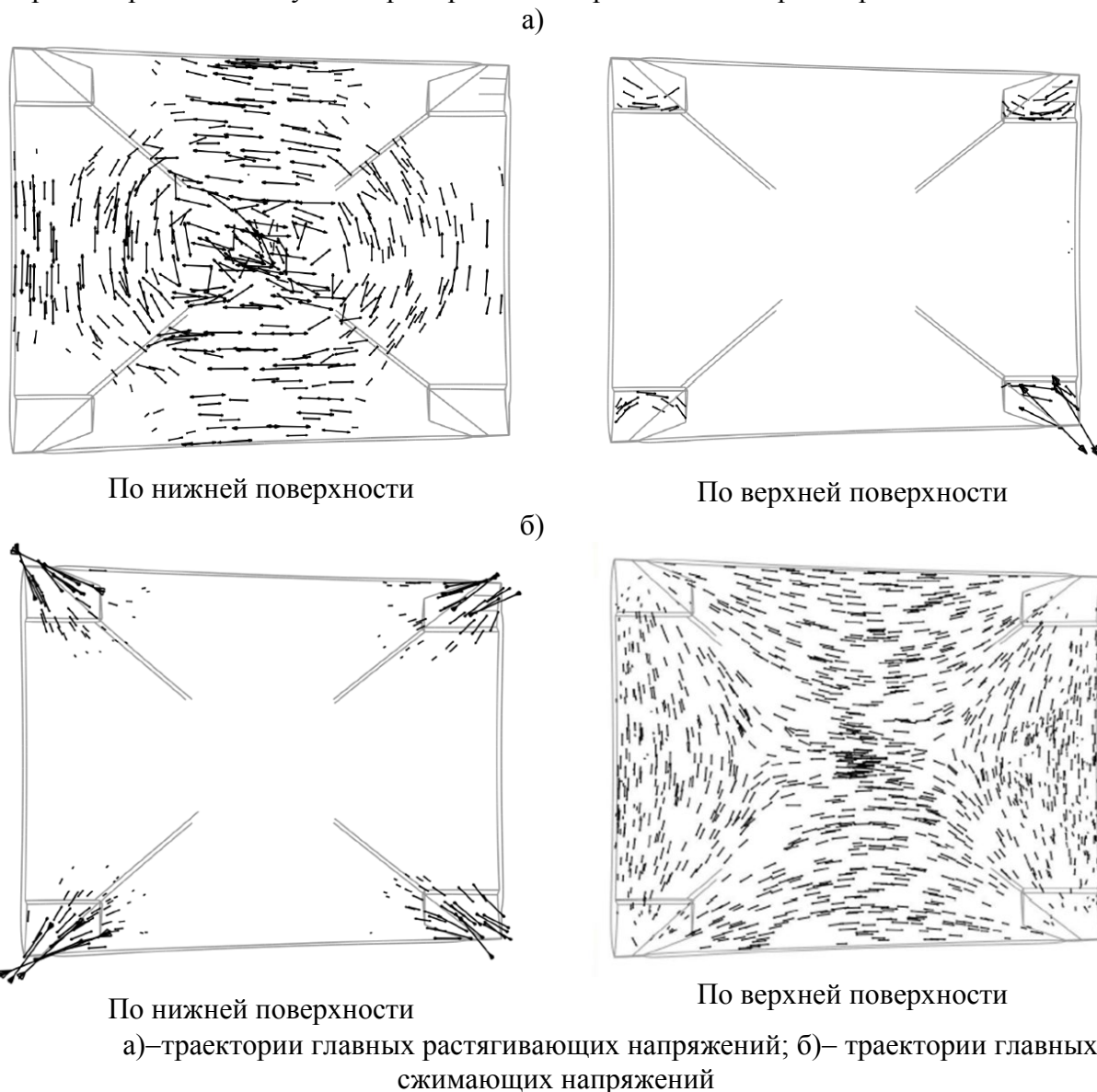


Рисунок 2. – Траектории действия главных напряжений в кирпичном своде

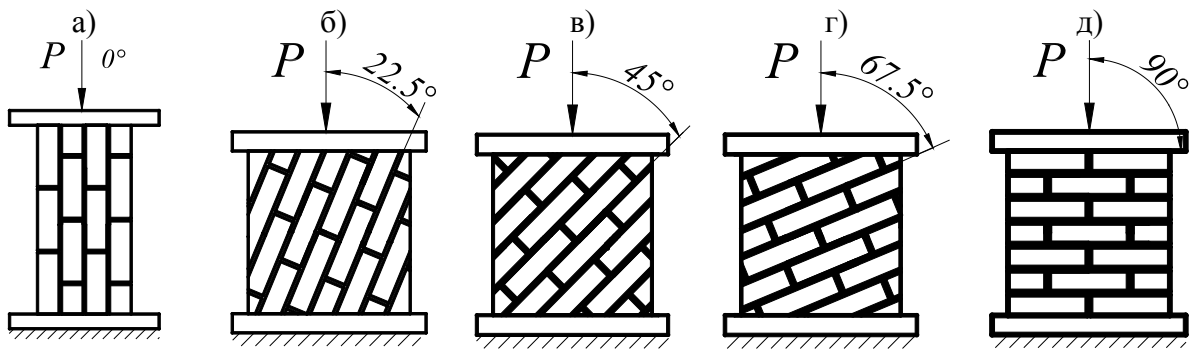
Проверка предельного состояния несущей способности распорной конструкции производится из условия, согласно которому значения главных напряжений в каменной кладке не должны превышать значений ее прочности при сжатии или растяжении в соответствующем направлении [7-9].

Проблема заключается в отсутствии в нормативных документах данных о прочности при сжатии и растяжении кладки под углами к ее главным осям анизотропии, которые совпадают с направлением вертикальных и горизонтальных растворных швов.

Исследование анизотропии прочности каменной кладки при сжатии и растяжении

С целью получения данных об анизотропии прочностных характеристик каменной кладки в филиале РУП «БелНИИС» -НТЦ были проведены испытания образцов, выполненных из полнотелого керамического кирпича, подверженных действию сжимающей и растягивающей нагрузки под различными углами к горизонтальным растворным швам.

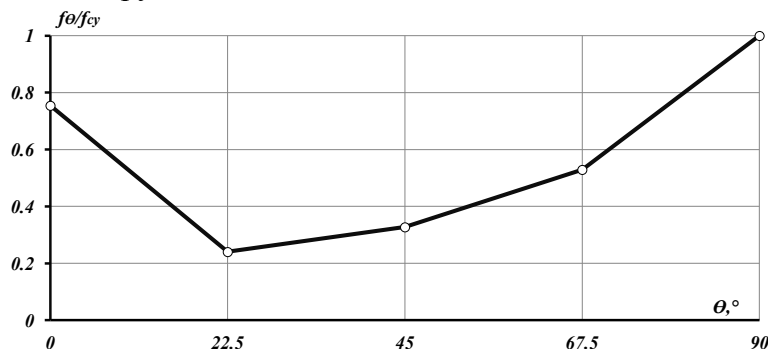
На сжатие испытывались опытные образцы кладки, изготовленные из полнотелого керамического кирпича М150 на известково-цементном растворе прочностью $f_m=7,9$ МПа (рисунок 3) [10-11].



а) $-\theta=0^0$; б) $-\theta=22,5^0$; в) $-\theta=45^0$; г) $-\theta=67,5^0$; д) $-\theta=90^0$

Рисунок 3.— Схема испытаний образцов кладки сжимающей нагрузкой под углами к горизонтальным растворным швам θ

Установлено, что прочность каменной кладки при сжатии и характер ее разрушения, в значительной степени определяется углом приложения сжимающей нагрузки к горизонтальным растворным швам. На рисунке 4 приведен график зависимости отношения прочностей при сжатии кладки под углом к горизонтальным растворным швам f_θ и $90^0(f_{cy})$ от угла направления сжимающей нагрузки θ .



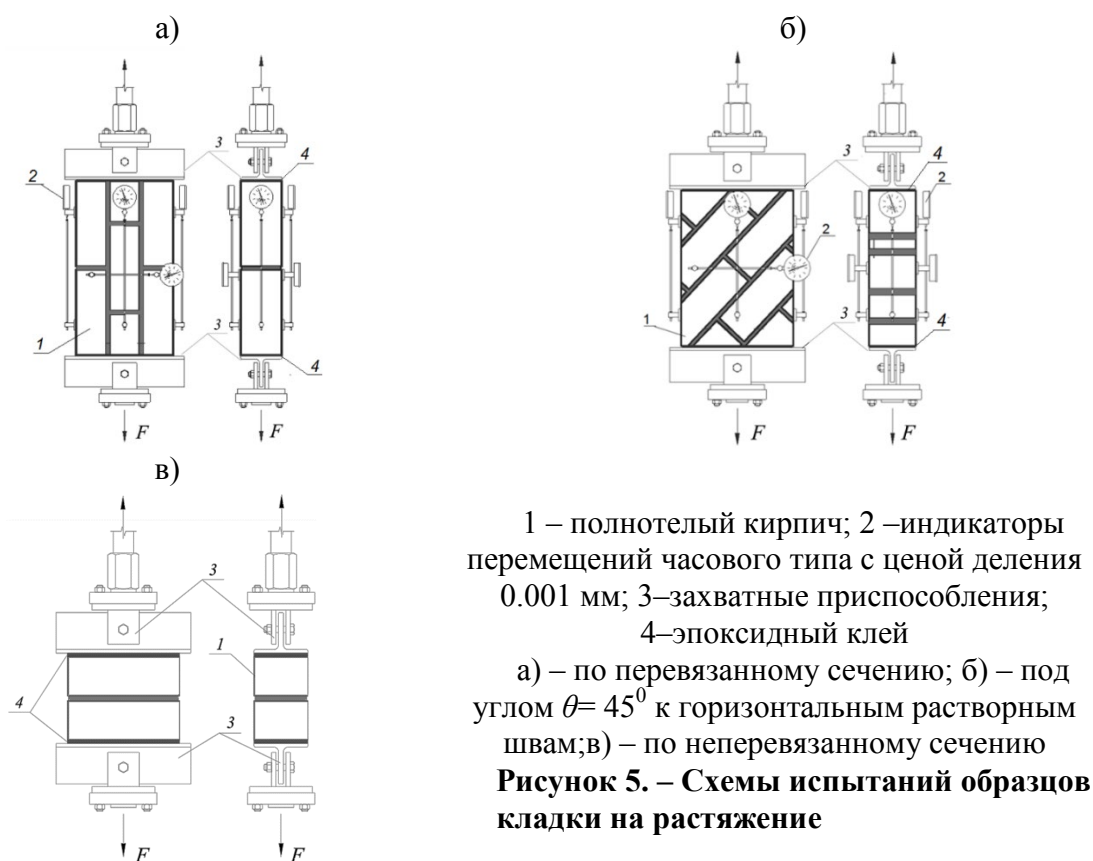
f_{cy} —прочность кладки при сжатии перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов

Рисунок 4.— График зависимости « $\frac{f_\theta}{f_{cy}} - \theta^0$ »

Из рисунка 4 следует, что минимальные значения прочности при сжатии кладки имеют место при направлении сжимающего усилия (F_c) под углами к горизонтальным швам клад-

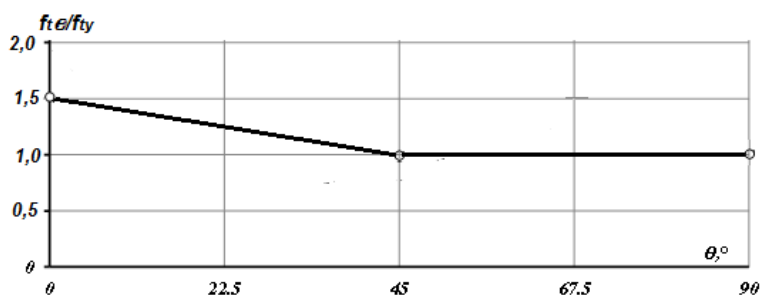
ки $\theta = 25^\circ - 40^\circ$. При указанных углах наклона F_c разрушение опытных образцов кладки происходило вследствие сдвига в плоскости горизонтальных растворных швов. Объясняется это тем, что при действии сжимающего усилия под углами $0^\circ < \theta < 90^\circ$ на характере разрушения каменной кладки отражаются возникающие в ней касательные напряжения, значения которых возрастают с уменьшением угла направления F_c к горизонтальным швам каменной кладки.

На осевое растяжение под углами $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ и 90° к плоскости горизонтальных швов кладки испытывались опытные образцы, изготовленные из полнотелого керамического кирпича М150 на известково-цементном растворе прочностью $f_m = 2,0$ МПа и $f_m = 7,0$ МПа (рисунок 5) [12-13].



Испытания показали, что прочность на растяжение кладки определялась прочностью кладочного раствора (f_m), но отношение прочности кладки при действии растягивающего усилия (F_t) перпендикулярно горизонтальным швам $f_{t,y}$ прочности кладки $f_{t,\theta}$ под углами $\theta = 0^\circ, 45^\circ$ не зависело от значения f_m .

Результаты испытаний образцов каменной кладки приведены на рисунке 6.



$f_{t,y}$ – прочность кладки при растяжении перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов

Рисунок 6. – График зависимости « $\frac{f_{t,\theta}}{f_{t,y}} - \theta^\circ$ »

Из рисунка 6 следует, что значения прочности на растяжение каменной кладки ($f_{t,\theta}$) при F_t под углами к горизонтальным швам $\theta = 45^\circ$ и 90° являются близкими. При растяжении опытных образцов вдоль горизонтальных растворных швов ($\theta = 0^\circ$) значения прочности на растяжение в 1,5 раза превышали значения $f_{t,\theta}$, установленные для углов $\theta = 45^\circ$ и 90° .

Заключение. Достоверная оценка несущей способности обследуемых кирпичных распорных конструкций может быть получена только при учете анизотропии прочностных характеристик каменной кладки из которой выполнена конструкция. Установив косвенно или прямыми методами испытаний прочность кладки на сжатие и растяжение перпендикулярно плоскости горизонтальных швов, на основании зависимостей, приведенных на рисунках 4, 6, можно ориентировочно оценить прочность каменной кладки в направлении траекторий главных сжимающих и растягивающих напряжений. Проверка предельного состояния несущей способности выполняется путем сопоставления расчетных значений прочностных характеристик каменной кладки с расчетными значениями главных напряжений, полученными в результате статического расчета распорной конструкции.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Исследования деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем. Методические рекомендации. - Министерство культуры РФ, Объединение Реставрация. - М.: 1989. - 171 с.
2. Lourenco, P.V. Computational Strategies for Masonry Structures. Dissertation, Delfi University of Technology. - Delfi, The Netherlands: 1996. - 210 p.
3. J.M. Sieczkowski Metody obliczen statycznych wytrzymałościowych sklepien w budowlach gotyckich/ Sieczkowski J.M., J.P. Szolomicki. - Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 1999. - 138 s.
4. Деркач, В.Н. Анизотропия деформационных свойств каменной кладки // Научно-технические ведомости СПбГПУ – Наука и образование. – 2011. – №1(117). – С. 201-298.
5. Деркач, В.Н. Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния // Строительство и реконструкция. - Орел: ОрелГТУ. - 2012. - №2(40). - С. 3-11.
6. Kubica J. Mechanika muru obciążonego w płaszczyźnie / J. Kubica // Monografie Politechniki Śląskiej. - Gliwice: 2011. - 382 p.
7. Page, A.W. An Experimental Investigation of the Biaxial Strength of Brick Masonry / A.W. Page // Proceedings of the Sixth International Brick Masonry Conference. - Rome: 1982. - pp. 3-15.
8. Гениев Г.А. Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов / Г.А. Гениев, А.С. Курбатов, Ф.А. Самедов. - М: Интербук, 1994. - 187 с.
9. Деркач, В.Н. Эмпирические критерии прочности каменной кладки в условиях сложного напряженного состояния / В.Н. Деркач, Р.Б. Орлович // Строительство и реконструкция. - Орел: ОрелГТУ. - 2010. - №6(32). - С. 8-12.
10. Деркач В.Н. Анизотропия прочности каменной кладки при сжатии / В.Н. Деркач // Научно-технические ведомости СПбГПУ – Наука и образование. - 2011. - №3(130). - С. 181-186.
11. Галалюк, А.В. Прочность каменной кладки при сжатии под различными углами к горизонтальным растворным швам // Строительная наука - 2014: теория, образование, практика, инновации (посвящается 55-летию ИСиА САФУ). Сборник трудов междунар. научно-техн. конф., г. Архангельск, 22-23 мая 2014 г. Под ред. Лабудина Б.В. - Архангельск: Изд-во ООО «Типография «ТОЧКА», 2014. - С. 68-73.
12. Деркач, В.Н. Прочность каменной кладки на растяжение под углом к горизонтальным растворным швам / В.Н. Деркач, В.В. Белов // Вестник гражданских инженеров. - 2012. - №2(31). - С. 65-70.
13. Деркач, В.Н. Прочность каменной кладки при осевом растяжении / В.Н. Деркач // Вестник гражданских инженеров. - 2012. - № 5(34). - С. 58-64.