

УДК 693.157:666.973+69.058.2+624.046

*КОПАНИЦА ДМИТРИЙ ГЕОРГИЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,  
kopanitsa@mail.ru*

*УСЕИНОВ ЭМИЛЬ СЕЙРАНОВИЧ, мл. научный сотрудник,  
useinov\_em@mail.ru*

*УСТИНОВ АРТЕМ МИХАЙЛОВИЧ, аспирант,  
gustov912010@mail.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,  
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

### **ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЕ ФРАГМЕНТА КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ДЕЙСТВИИ СЖИМАЮЩЕЙ СТАТИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ**

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований фрагмента кирпичной кладки на действие кратковременной статической нагрузки. При испытаниях принята диагональная схема нагружения, позволяющая создать в средней зоне образца главные растягивающие напряжения и оценить их влияние на характер разрушения. В процессе испытаний использованы бесконтактные методы измерения деформаций поверхности, позволившие определить последовательность появления и характер развития трещин при разрушении. Исследования показали, что зарождение трещин происходит от действия касательных деформаций в вертикальных швах фрагмента кирпичной кладки. С увеличением нагрузки преобладающее значение получили главные растягивающие деформации, явившиеся основной причиной разрушения кладки.

**Ключевые слова:** кирпичная кладка; деформации поверхности; виброскорость; трещинообразование.

*DMITRII G. KOPANITSA, DSc, Professor,  
kopanitsa@mail.ru*

*EMIL' S. USEINOV, Junior Research Assistant,  
useinov\_em@mail.ru*

*ARTEM M. USTINOV, Research Assistant,  
gustov912010@mail.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,  
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

### **DEFORMATION AND FRACTURE OF MASONRY UNDER COMPRESSIVE LOAD**

The paper presents the experimental results on masonry fragment exposed to static load. The diagonal loading scheme is used allowing to create main tensile stresses in the middle of masonry and estimate their impact on its fracture. Noncontact techniques are used for the surface deformation measurements that allow detecting the sequence and the nature of crack propagation during fracture. Investigations show that crack initiation is induced by tangent deformations in vertical joints of masonry. The load increase provides main tensile deformations that induce the fracture of masonry.

**Keywords:** masonry; surface deformation; vibration velocity; crack formation.

## Введение

Результаты экспериментальных исследований фрагментов кирпичной кладки на действие статических нагрузок приведены в работах [1, 2, 6, 8, 11]. На основе полученных результатов обоснованы и сформулированы предельные состояния кирпичной кладки в условиях сложного напряженного состояния. Результаты исследований использованы при разработке схем усиления кладки для повышения ее несущей способности и деформативности. Рассмотрены варианты применения аппликаций из железобетона и композитных материалов. Описаны деформации и схемы разрушения фрагментов кладки, испытанных при различных условиях закрепления и схемах приложения нагрузки. В меньшей степени исследованы вопросы динамической прочности кирпичной кладки. Особенности проведения кирпичной кладки при динамическом воздействии изучались при испытании фрагментов кирпичной кладки [3, 10] и на реальных объектах при разработке методов активной сейсмозащиты зданий [5, 7, 9, 10].

Экспериментально показано, что поведение кладки при статическом нагружении и при действии нагрузки со скоростью до 5 м/с практически совпадают [3]. Общепринятый подход при проведении статических испытаний конструкций заключается в поэтапном приложении нагрузки с выдержкой на этапе после стабилизации деформаций. Как правило, испытание образцов кирпичной кладки по ГОСТ 32047–2012 проводится в течение 15–30 мин.

Продолжительность действия нагрузки при испытаниях образцов на копре составляет 10–20 мс, при этом скорость нагружения определяется высотой падения груза. Известно, что в начальный момент действия в зоне контакта конструкции с ударником возникают ускорения, значительно превышающие по значениям величины ускорений, возникающих в реальных объектах, подверженных сейсмическому воздействию.

При испытании фрагмента кирпичной кладки на действие кратковременной статической нагрузки, например, в течение 5 с практически исключается возможность перераспределения внутренних усилий, характерного для статических испытаний, с выдержкой на этапе после стабилизации деформаций. Градиент нагрузки при кратковременном статическом нагружении в этом случае является промежуточным между скоростью статического нагружения и градиентом динамической нагрузки от падающего груза.

Скорость нагрузки на простенок кирпичного здания при сейсмическом воздействии может быть различной и определяется его расположением в конструкции здания. Поэтому поведение фрагмента кирпичной кладки на действие непрерывно увеличивающейся кратковременной статической нагрузки может служить моделью поведения кирпичной кладки при низкоскоростном нагружении. Полученные данные могут быть использованы для обоснования критериев прочности и проверки существующих методов расчета.

## Постановка эксперимента

В эксперименте реализована диагональная схема нагружения, позволяющая создать в средней зоне фрагмента кирпичной кладки главные растягивающие напряжения и оценить их влияние на процесс трещинообразования.

ния и разрушения. Экспериментальный образец размером  $103 \times 106 \times 25$  см выполнен каменщиком средней квалификации в лабораторных условиях с цепной системой перевязки швов из полнотелого глиняного кирпича марки М100 и кладочного раствора марки М75. Обоснование принятой схемы нагружения и размеров фрагмента изложено в работе [3]. Общий вид испытаний показан на рис. 1.

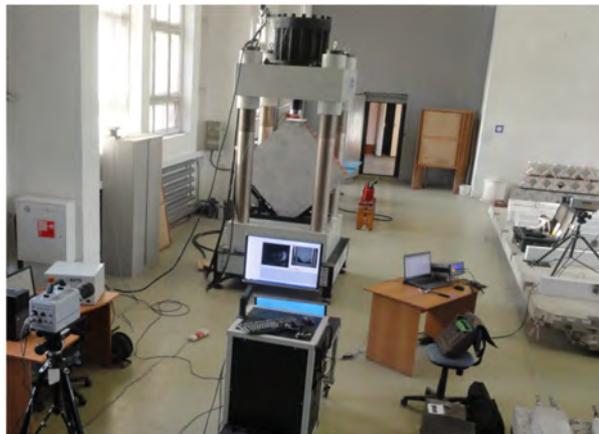


Рис. 1. Общий вид испытательного стенда

В качестве нагружающего устройства использована универсальная испытательная электрогидравлическая система Universal Testing Machine 4500 (UTM-4500). В состав системы входит блок цифрового преобразования сигналов SCON-1500 и программное обеспечение сервоконтроллера CATS. Система позволяет выполнять испытания с обратной связью по нагрузке и перемещениям. Скорость нагружения фрагмента принята равной  $98 \text{ кН/с}$ .

В процессе испытания проведены измерения деформаций и перемещений исследуемых фрагментов кладки с использованием бесконтактной системы анализа деформированного состояния VIC-2D со скоростью 10 Гц. Методология применения и принцип работы системы VIC-2D изложены в работе [4].

Процесс трещинообразования и разрушения опытного образца фиксировался высокоскоростной видеокамерой PHOTRON FASTCAM SA2 со скоростью 1000 Гц. Выходные данные с видеокамеры в виде покадровой раскладки позволили выполнить анализ деформаций фрагмента с использованием системы VIC-2D.

Для измерения виброскорости и перемещений фрагмента при образовании трещин использован лазерный виброметр (Remote Sensing Vibrometer) RSV-150. Луч гелий-неонового лазера фокусировался на крайней угловой точке фрагмента вдоль растянутой диагонали. В основе функционирования лазерного виброметра RSV-150 используется принцип гетеродинного интерферометра, формирующего высокочастотный несущий сигнал на фотодетекторе при помощи ячейки Брэгга. При отражении луча от колеблющегося объекта возникает эффект Доплера, скорость и перемещение колеблющегося объекта формируют частотную и фазовую модуляцию. Данная модуляция

восстанавливается в модуле обработки сигналов при использовании соответствующих декодеров. Информация о скорости восстанавливается по частотной модуляции доплеровского сигнала, сигнал перемещения – по фазовой модуляции. Отображение и анализ полученных результатов выполнен посредством программного обеспечения Polytec Vibrometer Software.

### Результаты эксперимента

Измерения показателей нагрузки, деформаций и динамических параметров исследуемого фрагмента проводились синхронно. Появление деформаций и их развитие до возникновения трещин определено показаниями оптической системы VIC-2D. Появление и развитие трещин на поверхности образца зафиксированы высокоскоростной камерой.

Диаграмма нагрузки, показанная на рис. 2, отражает поведение фрагмента в процессе увеличения нагрузки до полного разрушения.

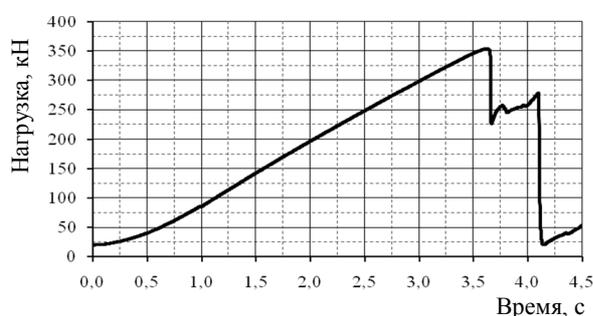


Рис. 2. Диаграмма нагрузки

Практически линейный рост нагрузки наблюдался в течение 3,623 с до значения 354 кН. На этом уровне нагрузка удерживалась 4 мс до образования двух отстоящих друг от друга на расстоянии 120 мм параллельных трещин в центральной части образца. На диаграмме этот процесс отражается резким падением нагрузки на 3,665 с до значения 227 кН. Между тем несущая способность образца не была исчерпана в полной мере, и при дальнейшем сжатии в течение 0,434 с наблюдалось увеличение сопротивления до значения нагрузки 277,3 кН. При этой нагрузке левая трещина получила развитие от центра к опоре, перерезав конструкцию фрагмента вдоль сжатой диагонали. Правая трещина развилась вверх до подвижной плиты пресса. Помимо вертикальных трещин, при нагрузке в указанный интервал времени образовались наклонные трещины от граней фрагмента к центру под углом к сжатой диагонали. Спад нагрузки на диаграмме в момент времени 4,137 с до 20,8 кН характеризуется потерей несущей способности фрагмента и разделением его на две части.

На рис. 3 показана диаграмма виброскорости угловой точки фрагмента по показаниям лазерного виброметра RSV-150, отражающая процесс трещинообразования и разрушения. Осцилляция на диаграмме виброскорости при нагрузке 323,9 кН на 3,263 с соответствует моменту локализации центров касательных деформаций, являющихся предвестником зарождения трещин.

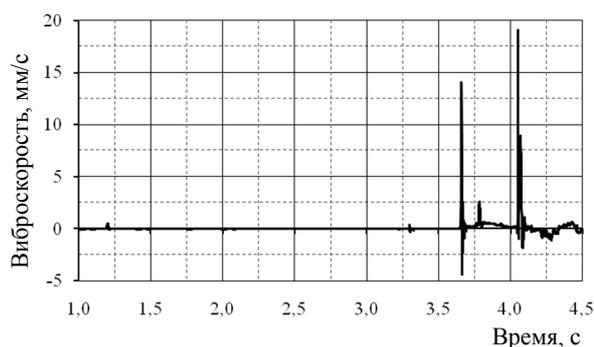


Рис. 3. Диаграмма виброскорости угловой точки фрагмента

Скачок виброскорости на 3,626 с до 14,02 мм/с при нагрузке соответствует началу разрушения фрагмента, характеризующегося падением нагрузки (см. рис. 2) и ростом поперечных деформаций. В течение 0,401 с происходило образование и развитие трещин, вплоть до возникновения сквозных трещин и разделения образца на две части.

Диаграмма горизонтальных перемещений, построенная по результатам измерений лазерного виброметра RSV-150 (рис. 4), отражает линейный рост деформаций во времени, продолжающийся до 3,628 с испытания.

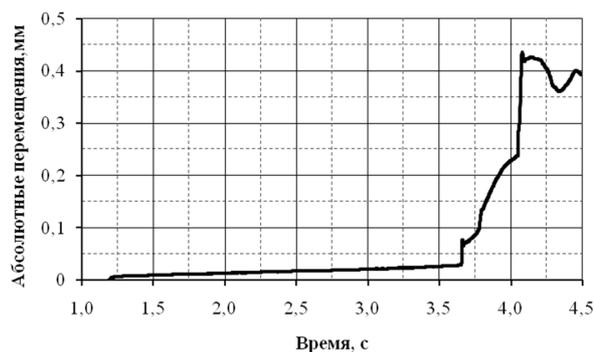


Рис. 4. Диаграмма абсолютных перемещений угловой точки фрагмента

Резкий скачок на диаграмме от 0,03 до 0,08 мм на 3,634 с обусловлен появлением вертикальных трещин в центральной части образца. С увеличением нагрузки происходило более плавное нарастание деформаций. Развитие вертикальных трещин от центра к опорам привело к росту перемещений до 0,44 мм.

Рассмотрим картины распределения деформаций по поверхности фрагмента, полученные по результатам обработки покадровой съемки с высокоскоростной видеокамеры, совмещенной с оптической системой VIC-2D. Зарождение трещин произошло с преобладающим развитием сдвиговых деформаций в вертикальных швах кладки. Увеличение нагрузки вызвало рост касательных и появление растягивающих деформаций, а при нагрузке 347 кН величины растягивающих деформаций превысили значения касательных в полтора раза, как показано на рис. 5, а.

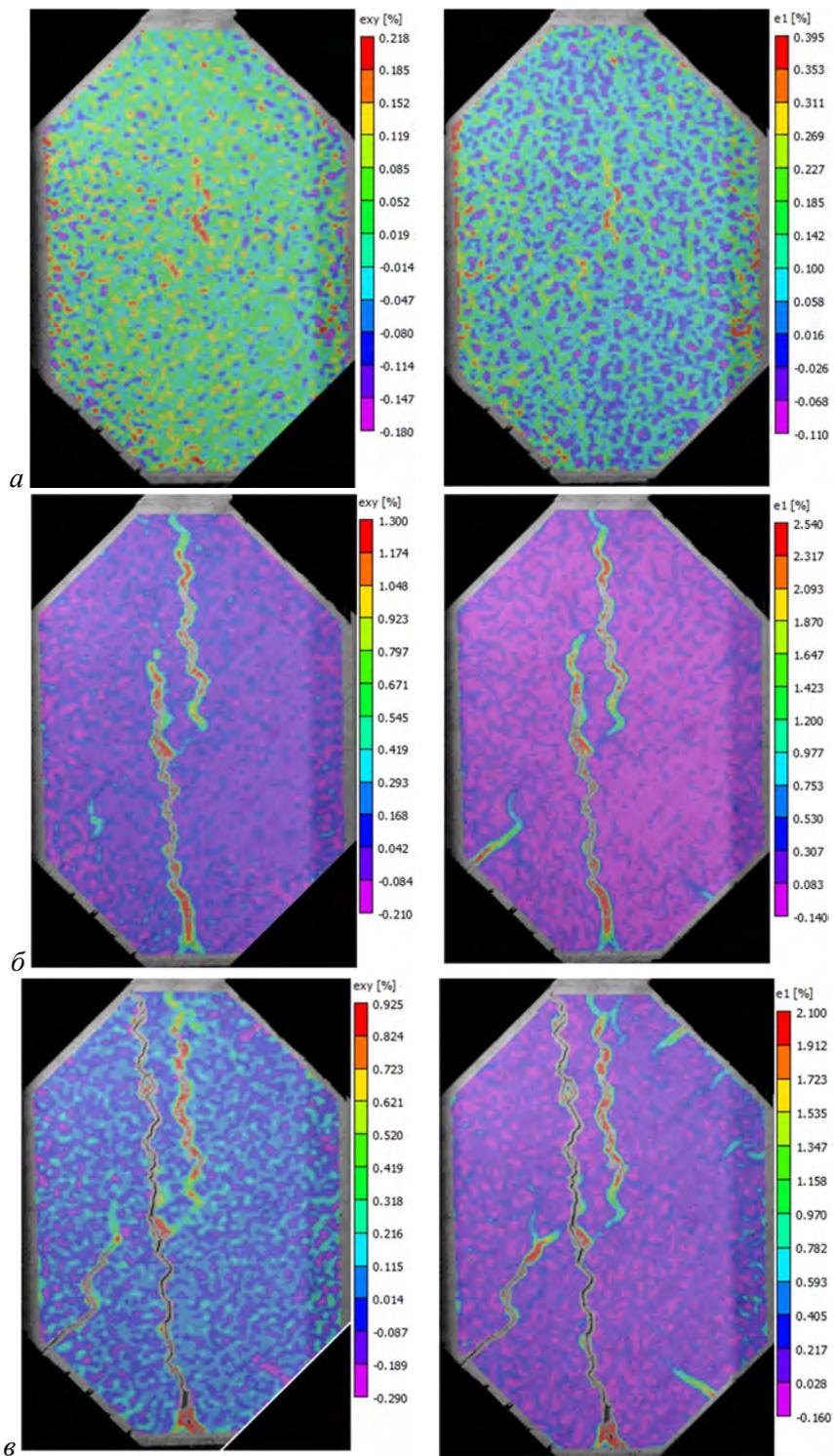


Рис. 5. Картины касательных (слева) и главных растягивающих (справа) деформаций

Помимо наметившейся правой трещины, действие касательных напряжений привело к зарождению второй трещины слева от нее и появлению заметных главных растягивающих деформаций. Увеличение нагрузки до максимального значения явилось причиной развития касательных и растягивающих деформаций вдоль сжатой диагонали на  $\frac{1}{3}$  от высоты фрагмента. На рис. 5, б показана картина распределения главных и касательных деформаций поверхности фрагмента в процессе активного трещинообразования и падения нагрузки до 227 кН. Картина деформаций, соответствующая процессу активного трещинообразования с потерей несущей способности фрагмента, приведена на рис. 5, в.

### Заключение

Экспериментальные исследования фрагмента кирпичной кладки проведены на действие кратковременной статической сжимающей нагрузки, приложенной по диагонали со скоростью 98 кН/с в течение 4,5 с.

Использование бесконтактных методов измерения деформаций поверхности с применением высокоскоростной камеры, совмещенной с системой VIC-2D и лазерным измерителем RSV-150, позволили определить причину зарождения и выявить характер перераспределения внутренних усилий, вызвавших появление и развитие трещин.

Измерения показали, что первые трещины возникли от действия касательных напряжений в вертикальных швах фрагмента кирпичиной кладки.

При увеличении нагрузки до разрушающей величины  $P_{ult} = 354$  кН в процессе перераспределения внутренних усилий в течение 0,4 с преобладающее значение получили главные растягивающие деформации, явившиеся основной причиной разрушения образца.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Джабаров, М.* Методы усиления кирпичных зданий пневмобетоном и штукатурными слоями в сейсмических районах : дис. ... канд. техн. наук / Академия наук Таджикской ССР, Институт сейсмостойкого строительства и сейсмологии. – Душанбе, 1986. – 221 с.
2. *Кожаринов, С.В.* Исследование деформаций кирпичной кладки при действии горизонтальных нагрузок / С.В. Кожаринов // Динамика и сейсмостойкость зданий и сооружений : сб. ИССС АН ТаджССР. – Душанбе, 1980. – С. 127–134.
3. *Копаница, Д.Г.* Экспериментальные исследования фрагментов кирпичной кладки на действие статической и динамической нагрузки / Д.Г. Копаница, О.В. Кабанцев, Э.С. Усеинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 4. – С. 157–178.
4. *Макроносители пластической деформации* в приповерхностных слоях стальных образцов, определенные методом корреляции цифровых изображений / Д.Г. Копаница, А.М. Устинов, А.И. Потеев, А.А. Клопов // Перспективные материалы в технике и строительстве : материалы II Всероссийской научной конференции молодых ученых с международным участием. – Томск : Изд-во ТГАСУ, 2015. – С. 40–43.
5. *Негматуллаев, С.Х.* Системы активной сейсмозащиты зданий и сооружений и возможности их экспериментального исследования на полигоне «Ляур» / С.Х. Негматуллаев, А.И. Золотарев. – Душанбе : Дониш, 1986.
6. *Поляков, С.В.* Монолитность каменной кладки / С.В. Поляков, С.М. Сафаргалиев. – Алма-Ата, 1991. – 160 с.

7. Проведение вибрационных испытаний 9-этажного каркасно-каменного жилого дома в г. Севастополе : рабочая программа к НИР: шифр «ЛИ-3-1986») / Дронов Ю.П., Ашкинадзе Г.Н., Симон Ю.А. – М. : ЦНИИЭП Жилища, 1990. – 65 с.
8. Экспериментальные исследования сейсмостойкости каменной кладки наружными бетонными аппликациями / Г.П. Тонких, О.В. Кабанцев, О.А. Симаков, А.Б. Симаков, С.М. Баев, П.С. Панфилов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2011. – № 2. – С. 35–42.
9. Фахритдинов, У. Исследование упругопластической работы каменных конструкций при знакопеременной нагрузке типа сейсмической / У. Фахритдинов // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2000. – № 6. – С. 30–32.
10. Tomaževic, M. Verification of seismic resistance of confined masonry buildings / M. Tomaževic, I. Klemenc // Earthquake Engineering and Structural Dynamics. – 1997. – 26. – P. 1073–1088.
11. Sousa, R. Diagonal compressive strength of masonry samples – experimental and numerical approach / R. Sousa, H. Sousa, J. Guedes // Materials and Structures. – 2013. – 46. – P. 765–786.

## REFERENCES

1. Dzhabarov M. Metody usileniya kirpichnykh zdaniy pnevmo betonom i shtukaturnymi sloyami v seismicheskikh raionakh: Diss. ... kand. tekhn. nauk [Reinforcement of brick buildings using jetcrete and plaster layers in seismic regions. PhD Thesis]. Dushanbe, Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. 1986. 221 p. (rus)
2. Kozharinov S.V. Issledovanie deformatsii kirpichnoi kladki pri deistvii gorizontallykh nagruzok [Masonry deformation under lateral load]. Dinamika i seismostoykost' zdaniy i sooruzhenii. Dushanbe, Institute of Geology, Earthquake Engineering and Seismology of Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. 1980. Pp. 127–134. (rus)
3. Kopanitsa D.G., Kabantsev O.V., Useinov E.S. Eksperimental'nye issledovaniya fragmentov kirpichnoi kladki na deistvie staticheskoi i dinamicheskoi nagruzki [Static and dynamic load tests of masonry]. Vestnik TSUAB. 2012. No 4. Pp. 157–178. (rus)
4. Kopanitsa D.G., Ustinov A.M., Potekaev A.I., Klopotov A.A. Makronositeli plasticheskoi deformatsii v pripoverkhnostnykh sloyakh stal'nykh obraztsov, opredelennye metodom korrelyatsii tsifrovyykh izobrazhenii [Identification of macro-carriers of plastic deformation in steel surface layers using digital image correlation method]. Proc. 2nd All-Rus. Sci. Conf. 'Advanced materials in Engineering and Construction'. 2015. Pp. 40–43. (rus)
5. Negmatullaev S.Kh., Zolotarev A.I. Negmatullaev S.Kh., Zolotarev A.I. Sistemy aktivnoi seismozashchity zdaniy i sooruzhenii i vozmozhnosti ikh eksperimental'nogo issledovaniya na poligone 'Lyaur' [Antiseismic systems and their experimental research in Lyaur polygon]. Dushanbe : Donish Publ., 1986. (rus)
6. Polyakov S.V., Safargaliev S.M. Monolitnost' kamennoi kladki [Masonry solidity]. Alma-Ata, 1991. 160 p. (rus)
7. Dronov Yu.P., Ashkinadze G.N., Simon Yu.A. Provedenie vibratsionnykh ispytaniy 9-ti etazhnogo karkasno-kamennogo zhilogo doma v g. Sevastopole [Vibration tests of many-storied frame dwelling building in Sevastopol]. Moscow : Central Research and Design Institute of Residential and Public Buildings, 1990. 65 p. (rus)
8. Tonkikh G.P., Kabantsev O.V., Simakov O.A., Simakov A.B., Baev S.M., Panfilov P.S. Eksperimental'nye issledovaniya seismostoykosti kamennoi kladki naruzhnymi betonnyimi aplikatsiyami [Experimental research of masonry seismic retrofit using concrete applications]. Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii. 2011. No 2. Pp. 35–42. (rus)
9. Fakhriddinov U. Issledovanie uprugoplasticheskoi raboty kamennykh konstrukttsii pri znako-pere-mennoy nagruzke tipa seismicheskoi [Elastoplastic behavior of masonry under seismic-type load]. Seismostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii. 2000, No 6, Pp. 30–32. (rus)
10. Tomaževic M., Klemenc I. Verification of seismic resistance of confined masonry buildings. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 1997. No. 26. Pp. 1073–1088.
11. Sousa R., Sousa H., Guedes J. Diagonal compressive strength of masonry samples – experimental and numerical approach. Materials and Structures. 2013. No. 46. Pp. 765–786.