

УДК 693.1.025:691.42.001.5

doi: 10.33622/0869-7019.2022.11.76-81

Резервы несущей способности каменных арок исторических зданий

Роман Болеславович ОРЛОВИЧ¹, доктор технических наук, профессор, научный консультант, orlowicz@mail.ru

Сергей Сергеевич ЗИМИН², кандидат технических наук, доцент, zimin_sergei@mail.ru

Валерий Николаевич ДЕРКАЧ³, доктор технических наук, директор, v-derkach@yandex.ru

Антон Владимирович ГАЛАЛЮК³, начальник отдела, halaliuk@mail.ru

¹ Проектный институт «Геореконструкция», 190005 Санкт-Петербург, Измайловский просп., 4

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29

³ Филиал РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, Республика Беларусь, 224023 Брест, ул. Московская, 267/2

Аннотация. При оценке несущей способности каменных арок исторических зданий обычно не учитывают их совместную работу с вышерасположенными участками каменной кладки. При этом каменные арки рассчитывают, как криволинейные стержни, а расположенные над ними конструкции рассматривают в качестве нагрузки. Проанализированы особенности напряженно-деформированного состояния каменных арок, а также их дефекты и повреждения. Приведены методика и анализ результатов экспериментальных исследований натурных образцов проездных арок. Выявлены механизмы трещинообразования и разрушения арок. Показано разгружающее влияние расположенных над арками участков каменной кладки. Установлено, что распределение сжимающих напряжений в арках существенно зависит от жесткости расположенных над ними участков каменной кладки. Участки с деградированной каменной кладкой оказываются менее способными к перераспределению нагрузок в арке. Перераспределение нагрузок существенно разгружает арки и изменяет механизм их разрушения. Сделан вывод о том, что расположенные над арками слои каменной кладки участвуют в перераспределении нагрузки от собственного веса, разгружая тем самым арки. Эффект их совместной работы возрастает с ростом стрелы подъема арок, а также толщины расположенной над арками кладки.

Ключевые слова: каменные арки и своды, разрушение каменных арок, перераспределение усилий в арках, критерии прочности каменных арок, механизмы разрушения каменных арок

Для цитирования: Орлович Р. Б., Зимин С. С., Деркач В. Н., Галалиук А. В. Резервы несущей способности каменных арок исторических зданий // Промышленное и гражданское строительство. 2022. № 11. С. 76–81. doi: 10.33622/0869-7019.2022.11.76-81

BEARING CAPACITY RESERVES OF STONE ARCHES OF HISTORICAL BUILDINGS

Roman B. ORLOVICH¹, orlowicz@mail.ru, **Sergey S. ZIMIN**², zimin_sergei@mail.ru

Valery N. DERKACH³, v-derkach@yandex.ru, **Anton V. HALALIUK**³, halaliuk@mail.ru

¹ Georekonstrukcia, Izmailovsky prospekt, 4, Saint Petersburg 190005, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Politekhnikeskaya ul., 29, Saint Petersburg 195251, Russian Federation

³ Branch Office of the RUE "Institute BelNIIS" – Scientific-Technical Center, Moscovskaya ul., 267/2, Brest 224023, Republic of Belarus

Abstract. When evaluating the bearing capacity of the masonry arches of historical buildings, their joint work with the higher masonry sections is usually not taken into account. At the same time, masonry arches are calculated as curvilinear rods, and the structures located above them are considered as a load. The features of the stress-strain state of masonry arches, as well as their defects and damages, are analyzed. The methodology and analysis of the results of experimental studies of full-scale samples of passage arches are presented. The mechanisms of crack formation and destruction of arches are revealed. The unloading effect of the masonry sections located above the arches is shown. It has been established that the distribution of compressive stresses in the arches significantly depends on the rigidity of the masonry sections located above them. Areas with degraded masonry are less able to redistribute loads in the arch. The redistribution of loads significantly unloads the arches and changes the mechanism of their destruction. It is concluded that the layers of masonry located above the arches are involved in the redistribution of the load from its own weight, thereby unloading the arches. The effect of their joint work increases with the growth of the arches lifting boom, as well as the thickness of the masonry located above the masonry arches.

Keywords: masonry arches and vaults, destruction of masonry arches, redistribution of forces in arches, strength criteria for masonry arches, mechanisms of destruction of masonry arches

For citation: Orlovich R. B., Zimin S. S., Derkach V. N., Halaliuk A. V. Bearing Capacity Reserves of Stone Arches of Historical Buildings. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2022, no. 11, pp. 76–81. (In Russ.). doi: 10.33622/0869-7019.2022.11.76-81

Введение

Каменные арки имеют многовековую историю, они неотъемлемые конструктивные элементы зданий и сооружений исторической застройки [1–4]. При оценке их технического состояния, ремонтах, реконструкции наиболее актуальным становится определение их действительных запасов прочности. В соответствии с требованиями СП 13-102-2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений» поверочные расчеты эксплуатируемых конструкций следует выполнять с учетом их реальных расчетных схем, которые должны учитывать не только имеющиеся дефекты и повреждения, но и реальные условия сопряжения с другими смежными конструкциями, а также вид и характер фактических нагрузок и их распределение по конструктивным элементам. Это требование особенно актуально для каменных арок, которые являются интегральной частью зданий. К таким аркам относятся проездные арки (рис. 1), которые стали предметом данного исследования.

Исходя из функционального назначения проездные арки, как правило, имеют пологие очертания с большими пролетами, достигающими 8–10 м. Ширина их поперечного сечения обычно равна толщине опирающихся на них стен, а высота сечения составляет от одной до двух с половиной длин кирпичей. Часто наблюдаемые повреждения арок — трещины, деградация и расслоение кладки и даже вывалы ее отдельных фрагментов, причиной которых могут быть эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия и другие факторы (рис. 2а) [3]. Встречаются также случаи повреждений проездных арок современными транспортными средствами, габариты которых не вписываются в очертания арок.



Рис. 1. Каменные арки в домовых проездах (а), в качестве несущих конструкций галерей (б) и архитектурных элементов (в)



Рис. 2. Деградация каменной кладки над аркой (а), усиление арок металлическим обрамлением (б, в)

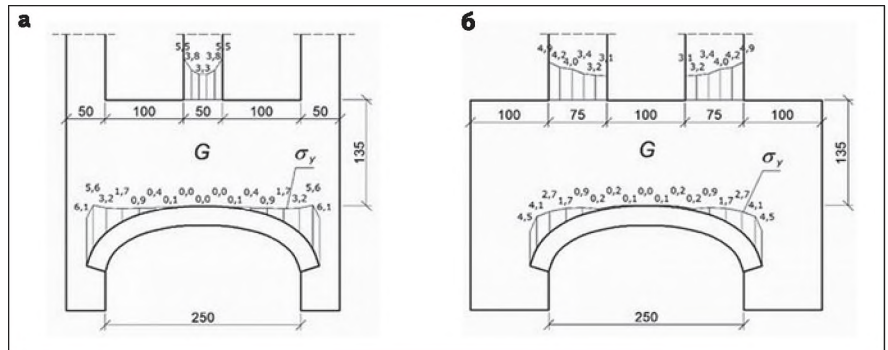


Рис. 3. Распределение контактных напряжений σ_y , МПа, под простенками и на внешней поверхности арки при различном расположении простенков над пролетом арки

Особенно неблагоприятна деградация растворных швов. В зданиях старой застройки они обычно выполнялись на слабых известковых растворах. В результате нарушения сцепления между растворными швами и камнями снижаются прочность кладки на растяжение и сдвиг, а также ее деформационные характеристики. Ремонт поврежденных проездных арок чаще всего осуществляется путем инъектирования трещин, вычинки поврежденных участков кладки либо их усилением с помощью обрамления стальными элементами (рис. 2б, в). Последний способ не только не соответствует

предъявляемым к историческим зданиям требованиям ГОСТ Р 59437–2021 «Сохранение памятников каменного зодчества. Общие требования», но и во многих случаях, с одной стороны, излишний, а с другой — бесполезный.

Решение о необходимости усиления арок принимают обычно не учитывая их резервы несущей способности, обусловленные совместной работой арок с расположенными над ними участками каменной кладки. При этом каменные арки рассчитывают, как криволинейные стержни, а расположенные над ними конструкции рассматривают в каче-

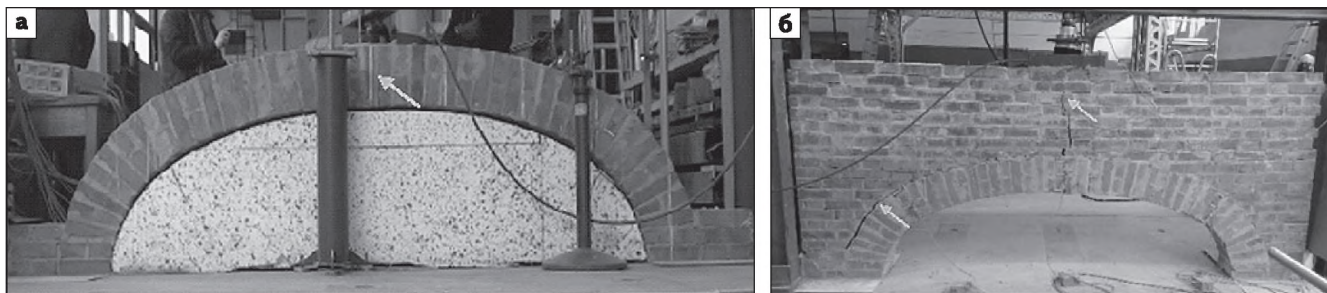


Рис. 4. Характер разрушения модели А каменной арки (а) и модели Б с расположенными над ней слоями каменной кладки толщиной 0,6 м (б). Стрелки показывают зоны образования трещин

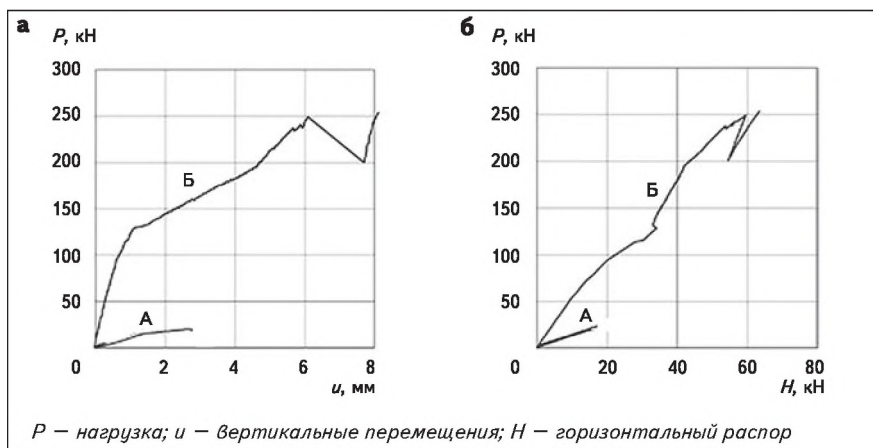


Рис. 5. Экспериментальные зависимости $P-u$ (а) и $P-H$ (б) для моделей арок А и Б

стве нагрузки. Критерием исчерпания несущей способности арок служит потеря их статического равновесия в результате преобразования в мгновенно изменяемую систему из-за образования трещин в растянутых зонах, которые эквивалентны шарнирам [1].

В большинстве случаев нагрузка на арки передается посредством расположенных над ними участков каменной кладки, которые стесняют вертикальные и горизонтальные перемещения сечений арок, оказывая на них тем самым разгружающее влияние. Например, согласно исследованиям [5], расположенные над арочными оконными перемычками слои каменной кладки участвуют в перераспределении нагрузки от их собственной массы и веса перекрытий, существенно разгружая перемычки. Установлено, что эффект их совместной

работы возрастает с увеличением стрелы подъема арок, а также толщины расположенных над ними слоев кладки.

В случае проездных арок нагрузка от расположенных над ними каменных стен передается через междуоконные простенки посредством подоконного пояса которому происходит перераспределение контактного давления на арку. Полученные с помощью программного комплекса ANSYS, реализующего МКЭ, эпюры распределения вертикальных контактных напряжений σ_y на внешней поверхности арки от действия нагрузки, передаваемой междуоконными простенками, приведены на рис. 3. Наибольшее давление на арку сосредоточено вблизи ее опорных зон и мало зависит от расположения простенков вдоль пролета арки. При этом подоконный пояс

работает как неразрезная балка-стенка, которая опирается на нижние участки стены и арку, разгружая ее.

Экспериментальные исследования

Разгружающий эффект зависит от соотношения изгибных жесткостей арки и подоконного пояса и может быть установлен теоретическим путем. Поскольку в подоконном поясе возникает сложное напряженное состояние, то для оценки его несущей способности требуется применение соответствующих критериев прочности [6, 7]. Более достоверная оценка разгружающего эффекта может быть получена экспериментальным путем. В связи с этим авторами выполнены лабораторные испытания арки коробового очертания в натуральном масштабе сечением 25×25 см, со стрелой подъема $f = 0,5$ м и пролетом в свету $L = 2,5$ м. Для сравнения рассмотрены две модели арок: модель А в виде самостоятельной несущей конструкции и модель Б, состоящая из арки с расположенным над ней слоем каменной кладки толщиной 0,6 м, который имитировал подоконный пояс.

Модели выполнены из кирпича М150 на цементном растворе марки М75. Нагрузка моделей силой P осуществлялась расположенным в середине их пролета гидравлическим домкратом посредством штампа, имитирующего междуоконный простенок шириной 50 см согласно схеме

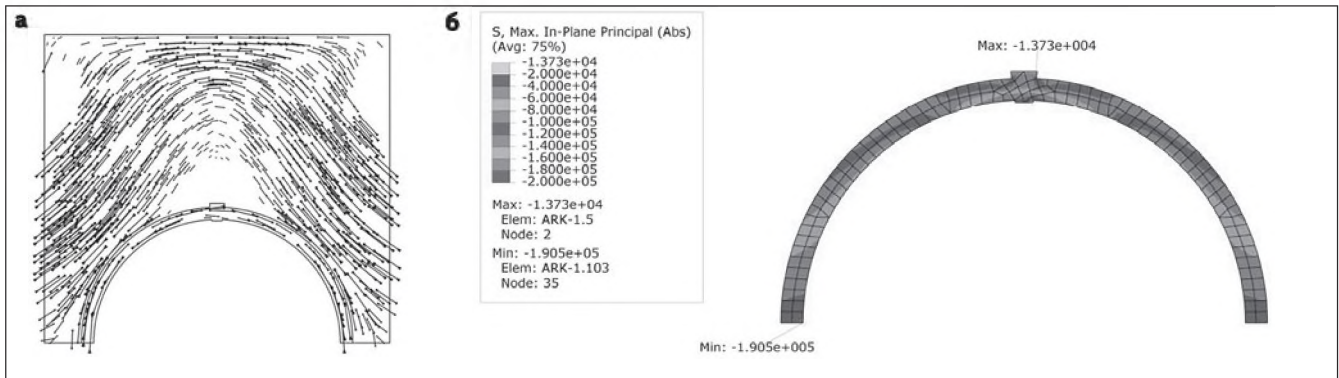


Рис. 6. Траектории главных сжимающих напряжений в стене, подкрепленной аркой (а), и изополя главных сжимающих напряжений, Па, в отдельно выделенной арке (б)

(рис. 3а). На всех этапах нагружения, вплоть до разрушения, измерялись вертикальные перемещения u в середине пролета арки, а также горизонтальный распор H в ее опорных пятах.

Разрушение модели А произошло при нагрузке $P = 19,8$ кН из-за потери статического равновесия в результате преобразования арки в мгновенно изменяемую систему вследствие развития трещин (шарниров) в замковой и пролетных участках (рис. 4а). Разруше-

ние модели Б произошло при нагрузке $P = 250$ кН, т. е. почти в 13 раз большей, чем модели А. Первоначально в замковой части арки при нагрузке $P = 130$ кН возникла вертикальная трещина с последующим распространением в расположенную над ней каменную кладку. При дальнейшем возрастании нагрузки, вплоть до разрушающей, произошел срез по растворным швам в зоне сопряжения арки с расположенной над ней каменной кладкой, играющей роль вторичной арки (рис. 4б).

Также из анализа экспериментальных зависимостей $P-u$ и $P-H$ (рис. 5) следует, что при одном и том же уровне нагрузки P жесткость модели Б была в 16 раз больше жесткости модели А,

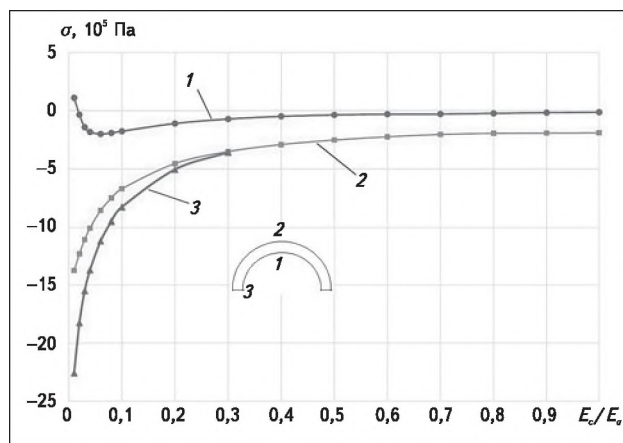


Рис. 7. Графики максимальных напряжений в нижней (1), верхней (2) замковой зоне и опорном (3) сечении арки в зависимости от соотношения модулей упругости кладки стены E_c и кладки арки E_a

а усилия распора H соответственно в 5 раз меньшими.

Теоретический анализ

Следует отметить, что эффективность включения в работу арок расположенных над ними слоев кладки существенно зависит от технического состояния последних. Наличие трещин, деградированных камней и растворных швов (см. рис. 2а) увеличивает деформативность кладки, снижая тем самым разгружающий эффект. Примером тому может служить декоративная каменная арка, которая объединяет два каменных корпуса, расположенных на берегах протоки р. Мойки комплекса Новой Голландии в Санкт-Петербурге (см.

рис. 1б). Конструкция возведена во второй половине XVIII в. по проекту архитектора Ж.-Б. Валлен-Деламота и состоит непосредственно из арки полуциркульного очертания пролетом 8 м и сечением 65×65 см, выполненной из известнякового камня. Над аркой возведена кирпичная стена толщиной 65 см и высотой 6,4 м, объединенная с торцевыми стенами расположенных по обе стороны речной протоки каменных зданий. Кроме того, нижняя

часть стены имеет общие с пятами арок опорные площадки.

В процессе инструментального обследования было установлено, что после многолетней эксплуатации из-за выветривания кладочных швов и деградации кирпича под действием атмосферных воздействий, в том числе загрязнения окружающей среды, кладка стены обладает рыхлой структурой. В то же время кладка самой арки находилась в удовлетворительном состоянии без явных признаков повреждений.

С целью анализа напряженно-деформированного состояния арки с учетом деградации расположенных над ней слоев кладки стены выполнены численные исследования с использованием

комплекса конечно-элементного моделирования ANSYS. Первоначально анализировалось напряженное состояние конструкции от действия собственного веса арки и расположенной над ней стеной при одинаковых значениях модулей упругости их кладок. Траектории главных сжимающих напряжений в стене, сопряженной с аркой, изображены на *рис. 6а*, а на *рис. 6б* — изополя главных напряжений, действующих непосредственно в арке.

Из их анализа следует, что в стене над аркой образуется условная вторичная (дублирующая) арка, форма которой определяется траекторией главных сжимающих напряжений. Несущая способность ее сечений зависит от их условной площади и сопротивления сжатию кладки под углом к горизонтальным растворным швам. Следует отметить, что сопротивление сжатию и модуль упругости каменной кладки в этом направлении меньше их значений по сравнению с сопротивлением перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов [8]. Несмотря на это условная вторичная арка существенно разгружает расположенную под ней фактическую арку, во всех сечениях которой

действуют только сжимающие напряжения, достигающие максимальных значений 0,19 МПа в опорных пятах (*рис. 6б*). Это значительно меньше установленного опытным путем расчетного сопротивления арочной кладки на сжатие $R = 0,5$ МПа.

Как уже отмечалось, деградация каменной кладки приводит к уменьшению не только ее прочности, но и деформационных характеристик. Графические зависимости максимальных напряжений в арке от соотношения модулей упругости каменной кладки стены E_c и арки E_a представлены на *рис. 7*. Из их анализа следует, что с уменьшением соотношения E_c/E_a происходит перераспределение напряжений в сечениях арки. При $E_c/E_a < 0,3$ в нижней замковой зоне сечения арки сжимающие напряжения уменьшаются и меняют знак на растягивающие (*кривая 1*). В то же время в верхней замковой зоне сечения сжимающие напряжения возрастают (*кривая 2*). Это связано с увеличением свободы горизонтальных и вертикальных перемещений пролетных сечений арки при уменьшении жесткости расположенной над ней стены. При приближении жесткости стены к нулевому значению арка работает

как самостоятельная конструкция под действием массы расположенной над ней стены. При этом наибольшие сжимающие напряжения возникают в опорных пятах арки (*кривая 3*), а их равнодействующая равна весу стены и арки. Следует отметить, что величина этих напряжений примерно в 10 раз превышает их величину при $E_c = E_a$, когда арка максимально разгружается совместно работающей расположенной над ней стеной.

Выводы

1. При оценке несущей способности проездных каменных арок исторических зданий рекомендуется учитывать разгружающее влияние расположенных над арками участков каменных стен, что позволит в ряде случаев обосновать отсутствие необходимости усиления арок.

2. Эффект повышения несущей способности арки зависит от соотношения ее изгибной жесткости и жесткости расположенного над аркой слоя каменной кладки.

3. Деструкция расположенной над аркой каменной кладки снижает эффект ее включения в работу арок, что необходимо учитывать в расчетах.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем / Союзреставрация, Росреставрация. М., 1989. 172 с.
2. Бернгард В. Р. Арки и своды. Руководство по устройству и расчету арочных и сводчатых перекрытий. СПб : Типография Ю. Н. Эрлих, 1901. 128 с.
3. Физдель И. А. Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения. М. : Стройиздат, 1987. 178 с.
4. Ahnert R., Krause K. H. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1, 2. [Типичные строительные конструкции, возведенные с 1860 по 1960 гг. для оценки существующих строительных материалов]. Berlin, 2009.
5. Орлович Р. Б., Новак Р., Деркач В. Н. Несущая способность каменных перемычек // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 7. С. 52–57.
6. Гениев Г. А., Курбатов А. С., Самедов Ф. А. Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов. М. : Интербук, 1993. 187 с.
7. Ricci E., Sacco E., Piccioni M. A method for the analysis of masonry arches [Методы анализа каменных арок] // Proc. of 10th International conference on structural analysis of historical constructions. Leuven, Belgio, 2016. Pp. 112–118.
8. Деркач В. Н., Галалюк А. В., Беспалов В. В. Несущая способность кирпичных сводов исторических зданий // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения. Материалы VIII Международ. науч.-практ. конф. 13 октября 2017 г. СПб : Изд-во политехн. ун-та, 2017. С. 63–70.

REFERENCES

1. *Issledovanie deformacij, raschet nesushchej sposobnosti i konstruktivnoe ukreplenie drevnih raspornyh system* [Study of deformations, calculation of load-bearing capacity and structural reinforcement of ancient spacer systems]. Moscow, 1989. 172 p. (In Russ.).
2. Bergard V. R. *Arki i svody: Rukovodstvo po ustrojstvu i raschetu arochnyh i svodchatyh perekrytij* [Arches and vaults: A guide to the design and calculation of arched and vaulted ceilings]. St. Petersburg, Tipografiya Yu. N. Erlih Publ., 1901. 128 p. (In Russ.).
3. Fizdel I. A. *Defekty v konstrukciyah, sooruzheniyah i metody ih ustraneniya* [Defects in constructions, structures and methods of their elimination]. Moscow, Strojizdat Publ., 1987. 178 p. (In Russ.).
4. Ahnert R., Krause K. H. *Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz*. Band 1, 2. Berlin, 2009.
5. Orlovich R. B., Novak R., Derkach V. N. Bearing capacity of masonry flat arches. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, 2017, no. 7, pp. 52–57. (In Russ.).
6. Geniev G. A., Kurbatov A. S., Samedov F. A. *Voprosy prochnosti i plastichnosti anizotropnyh materialov* [Issues of strength and plasticity of anisotropic materials]. Moscow, Interbuk Publ., 1993. 187 p. (In Russ.).
7. Ricci E., Sacco E., Piccioni M. A method for the analysis of masonry arches. *Proc. of 10th International conference on structural analysis of historical constructions*. Leuven, Belgio, 2016, pp. 112–118.
8. Derkach V. N., Galalyuk A. V., Bepalov V. V. Bearing capacity of brick vaults of historical buildings. *Obsledovanie zdaniy i sooruzhenij: problemy i puti ih resheniya: materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii*. October 13, 2017. St. Petersburg, Politekhn. un-t Publ., 2017, pp. 63–70. (In Russ.). ■