

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND ENGINEERING STRUCTURES



Оригинальное эмпирическое исследование

УДК 693

<https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-40-47>

Оценка несущей способности цилиндрических каменных сводов с учетом их повреждений

С.С. Зимин¹ , Р.Б. Орлович², С.В. Данилов³ , Ю.Г. Москалькова³ 

¹ Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Российская Федерация,

² ООО «ПИ Георекострукция», г. Санкт-Петербург, Российская Федерация

³ Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Беларусь

✉ zimin_sergei@mail.ru



EDN: RVIBJI

Аннотация

Введение. Расчет цилиндрических каменных сводов исторических зданий, зачастую, выполняют в стержневой постановке. При этом доминирующее значение на несущую способность сводов имеет соотношение изгибающих моментов M и продольных сил N , а также наличие трещин. Последнее не позволяет вести анализ несущей способности сводов стандартными методами. Целью исследований является отработка методики оценки несущей способности цилиндрических каменных сводов с трещинами.

Материалы и методы. Выполненные авторами экспериментальные исследования подтверждают, что появление одной и даже нескольких трещин не всегда является признаком исчерпания несущей способности сводов. Верхняя граница несущей способности определяется наличием такого количества условных шарниров (трещин), которое переводит свод в кинематический механизм. Вести анализ работы сводов с трещинами вплоть до их физического разрушения возможно с использованием так называемых интеракционных зависимостей, отражающих предельные соотношения $M_{Rd}-N_{Rd}$.

Результаты исследования. Интеракционные зависимости $M_{Rd}-N_{Rd}$ определены авторами экспериментальным путем. Также в ходе проведенных экспериментов выявлены механизмы разрушения цилиндрического свода в зависимости от соотношения $M_{Rd}-N_{Rd}$. Так, при действии только изгибающего момента разрушение образца произошло по неперевязанному сечению каменной кладки; при действии только сжимающего усилия – в результате образования продольных трещин; при совместном действии сжимающей силы и изгибающего момента характер разрушения зависел от соотношения этих сил. Также выполнена верификация численной модели, с помощью которой возможно построение интеракционных зависимостей.

Обсуждение и заключение. Отработана методика оценки несущей способности цилиндрических каменных сводов с трещинами с использованием интеракционных зависимостей, отражающих предельные соотношения $M_{Rd}-N_{Rd}$. Показано, что непосредственно интеракционные зависимости возможно построить с помощью численных твердотельных моделей, предварительно «настроив» их на результаты ряда простейших испытаний кладки. Фактические значения M и N в сечениях определяются на стержневых моделях сводов. Оценка несущей способности сводов ведется путем сопоставления определенной комбинации $M-N$ с кривой интеракционной зависимости.

Ключевые слова: каменные своды, цилиндрические своды, трещины в каменных сводах, разрушение сводов, несущая способность, механизмы разрушения сводов

Для цитирования. Зимин С.С., Орлович Р.Б., Данилов С.В., Москалькова Ю.Г. Оценка несущей способности цилиндрических каменных сводов с учетом их повреждений. *Современные тенденции в строительстве, градостроительстве и планировке территорий*. 2026;5(1):40–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-40-47>

Evaluation of the Load-Bearing Capacity of Cylindrical Stone Vaults Taking their Damage into Account

Sergej S. Zimin¹  , Roman B. Orlovich², Sergej V. Danilov³ , Yuliya G. Maskalkova³ 

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation

²LLC PI Georekonstrukcia, St. Petersburg, Russian Federation

³Belarusian-Russian University, Mogilev, Republic of Belarus

 zimin_sergei@mail.ru

Abstract

Introduction. The calculation of cylindrical stone arches of historical buildings is often performed in a core setting. At the same time, the ratio of bending moments M and longitudinal forces N , as well as cracks has a major effect on the load-bearing capacity of arches. The latter does not allow the analysis of the load-bearing capacity of arches by means of the standard methods. The aim of the study is to develop a methodology for assessing the load-bearing capacity of cylindrical stone arches with cracks.

Materials and Methods. The experimental studies confirm that one or even a few cracks are not invariably a sign of exhaustion of the load-bearing capacity of arches. The upper limit of the load-bearing capacity is due to such a number of conditional hinges (cracks), which converts the arch into a kinematic mechanism. It is possible to analyze the operation of vaults with cracks up to their physical destruction by means of the so-called interaction dependencies reflecting the limiting ratios $M_{Rd}-N_{Rd}$.

Research Results. The interactive dependencies of $M_{Rd}-N_{Rd}$ were identified experimentally. The experiments also revealed the mechanisms of destruction of the cylindrical vault depending on the ratio $M_{Rd}-N_{Rd}$. Thus, under the action of only the bending moment, the destruction of the sample occurred along an unconnected section of the masonry; under the action of only the compressive force, as a result of the formation of longitudinal cracks; under the combined action of the compressive force and the bending moment, nature of the destruction depended on the ratio of these forces. The numerical model have been verified that can be used in order to design interactive dependencies.

Discussion and Conclusion. A methodology has been developed for assessing the load-bearing capacity of cylindrical stone arches with cracks using interactive dependencies reflecting the limiting ratios $M_{Rd}-N_{Rd}$. It is shown that it is possible to directly design interactive dependencies with numerical solid-state models, having previously "fine-tuned" them to the results of a number of simple masonry tests. The actual values of M and N in the cross sections are identified using the rod models of the arches. The load-bearing capacity of the arches is evaluated by comparing a certain combination of $M-N$ with the interaction dependence curve.

Keywords: stone vaults, cylindrical vaults, cracks in stone vaults, destruction of vaults, load-bearing capacity, mechanisms of destruction of vaults.

For citation. Zimin SS, Orlovich RB, Danilov SV, Maskalkova YuG Evaluation of the Load-Bearing capacity of Cylindrical Stone Vaults Taking their Damage into Account. *Modern Trends in Construction, Urban and Territorial Planning*. 2026;5(1):40–47. <https://doi.org/10.23947/2949-1835-2026-5-1-40-47>.

Введение. Каменные своды имеют более чем тысячелетнюю историю и являются одними из основных конструктивных элементов зданий исторической застройки. При этом анализ их работы до сих пор является актуальным при оценке технического состояния, ремонтах, реконструкции и модернизации зданий. Часто наблюдаемыми дефектами сводов являются трещины, деградация и расслоение кладки и даже вывалы ее отдельных фрагментов, причиной которых могут быть неравномерные осадки фундаментов, эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия, техногенные и другие факторы [1–6]. Особенно неблагоприятным является деградация растворных швов, которые в зданиях старой застройки обычно выполнялись из слабых известковых растворов. В результате нарушения сцепления между растворными швами и камнями снижается прочность кладки на растяжение и сдвиг по неперевязанным сечениям.

Несущая способность сводов зависит не только от механических характеристик кладки и накопившихся в них повреждений, но и от геометрии и характера нагружения, предопределяющих особенности напряженно-деформированного состояния и механизмов разрушения. В цилиндрических сводах доминирующее значение имеет соотношение изгибающих моментов M и продольных сил N . При этом оптимальным является очертание свода, совпадающее с кривой давления. Глубокие трещины, расчленяющие свод на несколько крупных соприкасающихся блоков, соответствуют шарнирам расчетных схем и образуют как устойчивые одно-, трехшарнирные, так

и мгновенно изменяемые многошарнирные схемы¹. Образование шарниров обусловлено выходом кривой давления за пределы ядра сечения и развитием трещин в растянутой зоне из-за низкого сцепления камней с раствором, в результате чего в ослабленных сечениях превалируют сжимающие напряжения (рис. 1). При этом высота растянутой зоны поперечного сечения высотой h увеличивается пропорционально уменьшению высоты сжатой зоны h_c , определяемой из следующего выражения: $h_c = 2 \cdot (0,5 \cdot h - M/N)$.

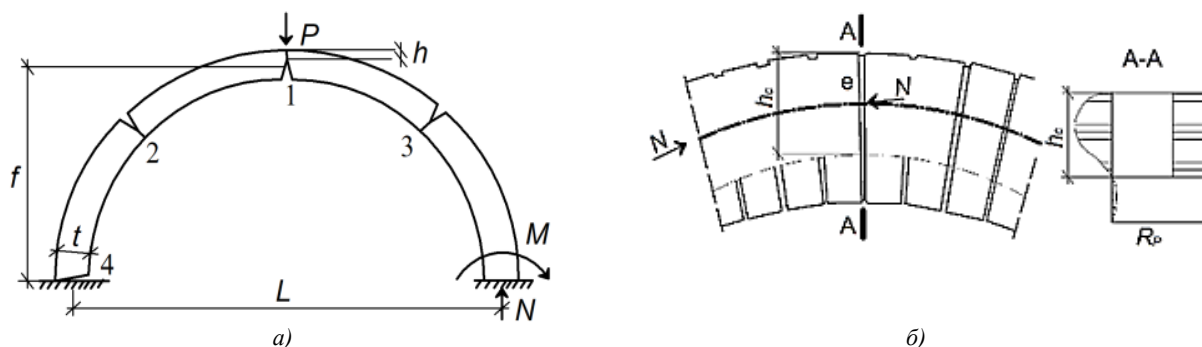


Рис. 1. Механизм разрушения цилиндрических сводов: а — схема образования шарниров в сечениях сводов с трещинами; б — напряженное состояние сечения с трещиной [10]

Материалы и методы. Следует отметить, что из-за изменчивости эксцентриситета $e = M/N$ вдоль кривой свода местоположение возможных шарниров, особенно при повреждениях в виде трещин, также является изменчивым. В связи с этим при оценке несущей способности исторических сводов существенным является правильный выбор их расчетной схемы, учитывающей не только граничные условия, но и повреждения. Проблема заключается в том, что детальная локализация повреждений и прежде всего трещин с определением их геометрических параметров возможна только с внутренней поверхности свода. Инвентаризация повреждений с внешней стороны сводов, как правило, затруднена, а иногда и невозможна, так как эта поверхность обычно недоступна для детального осмотра. Последнее связано с тем, что обследование сводов чаще всего начинается до начала их восстановления, когда внутренняя поверхность бывает оштукатуренной, а внешняя скрыта под существующим полом. Это значительно снижает достоверность обследований и уменьшает исходные данные для поверочных расчетов в соответствии с требованиями норм, таких как ГОСТ 31937-2024 «Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния».

Следует отметить, что наличие трещин в сводах не всегда является признаком исчерпания их несущей способности. Подтверждением этому являются выполненные авторами экспериментальные исследования механизма разрушения образцов каменных арок с соотношением высоты к пролету $f/L = 0,5$. Опорные зоны образцов выполнены жесткими, исключаяющими возможность их поворота. Испытания осуществлялись гидравлическими домкратами в виде сосредоточенной нагрузки, приложенной симметрично в середине пролета образцов (рис. 2). На всех этапах испытаний вплоть до разрушения процесс деформирования и трещинообразования фиксировался скоростной камерой высокого разрешения. Одновременно индукционными датчиками регистрировались вертикальные деформации и-образов. Кроме того, с помощью тензометрических датчиков регистрировались относительные деформации в характерных сечениях образцов. Показания всех измерительных приборов считывались с помощью одного тензометрического моста НВМ Hottinger MGCplus с частотой 10 Гц. Разрушение образцов носило хрупкий характер и сопровождалось образованием трещин, которые идентифицировались с образованием шарниров. На рис. 2 б приведена экспериментальная зависимость вертикальных деформаций и-замкового участка арки от величины нагрузки P . При этом можно выделить четыре характерных уровня нагрузки, при которых в связи с образованием шарниров происходило изменение статической схемы арки. На первом уровне при нагрузке $P = 6,7$ кН, составляющей около 45 % величины разрушающей нагрузки $P_p = 14,8$ кН, в средней замковой части арки образовался первый шарнир. Следующие два шарнира 2 и 3 образовались практически одновременно при уровнях испытательной нагрузки, составляющих соответственно 84 % и 90 % от разрушающей. Окончательное разрушение произошло при нагрузке $P_p = 14,8$ кН в результате образования четвертого шарнира в правой опорной пяте арки, после чего она превратилась в мгновенно изменяемую систему (рис. 2 а).

¹ Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем: методические рекомендации. М.: Росреставрация; 1989. 164 с. URL: <https://www.restsouz.ru/upload/guidelines/003-BessonovGB-Issledovanie-deformacij-raschyot-nesushchej-sposobnosti-i-konstruktivnoe-ukreplenie-drevnih-raspornykh-sistem.pdf> (дата обращения: 03.02.2026).

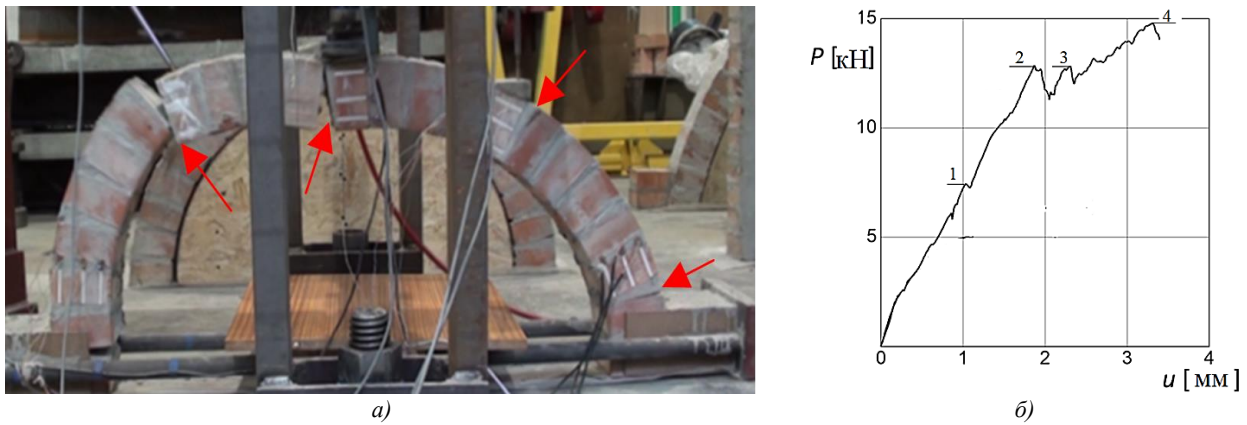


Рис. 2. Механизм разрушения: *а* — каменная арка; *б* — экспериментальная зависимость между величиной нагрузки P и прогибом u -замкового участка [10]

Из приведенных экспериментальных данных следует, что наличие одной трещины в цилиндрических сводах не является признаком исчерпания их несущей способности. Это обстоятельство следует учитывать при обследовании сводов и расчетной проверке их действительной несущей способности в соответствии с требованиями норм. Решение этой задачи возможно численным методом, позволяющим моделировать процесс развития трещин в наиболее напряженных сечениях сводов (рис. 3).

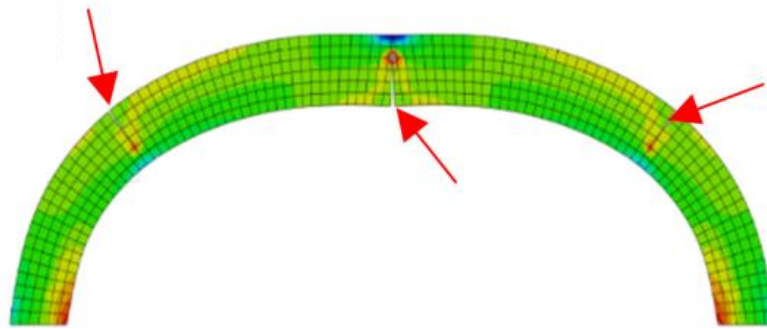


Рис. 3. Напряженно-деформированное состояние арки в стадии образования трещин (указано стрелками) при моделировании методом конечных элементов [10]

Однако в этом случае возникают трудности с учетом геометрической и физической нелинейности, связанные с процессом образования трещин и переходом материала каменной кладки в сжатой зоне сечений с трещинами в пластическое состояние. В связи с этим более предпочтительным может быть кинематический метод, позволяющий оценивать верхнюю границу несущей способности сводов [7–9]. С этой целью используются интеракционные зависимости между изгибающими моментами M_{Rd} и сжимающими усилиями N_{Rd} , при которых наступает переход сечения в предельное состояние (рис. 4).

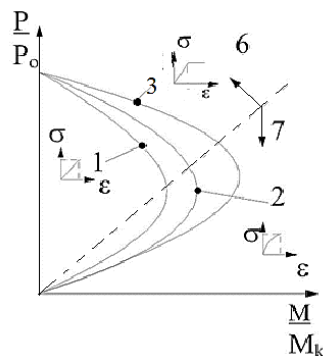


Рис. 4. Кривые интеракции между сжимающим усилием N_{Rd} и изгибающим моментом M_{Rd} в сжато-изгибаемых каменных конструкциях при линейной (1), параболической (2) и идеально пластической (3) зависимостях σ - ϵ каменной кладки [9]

Применительно к оценке несущей способности сводов суть этого метода заключается в реализации следующих процедур. На первом этапе с помощью аналитических методов расчета криволинейных стержней определяются нормальные усилия N и изгибающие моменты M в каждом из сечений свода. При этом выявленные в процессе обследований сводов трещины моделируются в виде шарниров. На следующем этапе полученные значения M и N сравниваются с интеракционными зависимостями предельных значений изгибающих моментов M_{Rd} и продольных сил N_{Rd} , превышение которых означает образование шарнира, который вводится в расчетную схему. Процесс продолжается вплоть до образования последнего шарнира, при котором арочная система трансформируется в механизм (рис. 1 а).

Результаты исследования. Определение интеракционных зависимостей $M_{Rd}-N_{Rd}$ возможно экспериментальным либо численным методами, примером чего являются выполненные авторами исследования. Экспериментальные исследования проводились на 5 образцах кладки размерами $12 \times 25 \times 105$ см из полнотелого кирпича (размер кирпича $12 \times 25 \times 6,5$ см) марки М250 на цементном растворе марки М50. Нагружение образцов осуществлялось с помощью двух независимых гидравлических домкратов, создающих осевое сжатие N и поперечную нагрузку P , вызывающую изгибающий момент (рис. 5).

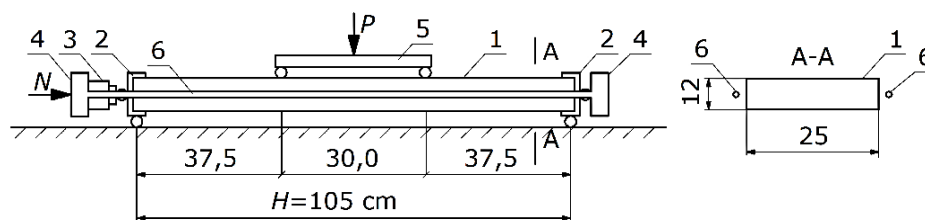


Рис. 5. Схема испытаний опытных каменных образцов на сжатие с изгибом: 1 — испытуемый образец; 2 — стальные оголовки с шарнирами; 3 — гидравлический домкрат, создающий усилие N ; 4 — траверсы для крепления стальных затяжек и гидравлического домкрата; 5 — распределительная балка; 6 — стальные затяжки с силомером [10]

Первый образец был испытан на центральное сжатие осевым усилием N , второй — на изгиб, а остальные образцы испытывались на сжатие с изгибом, причем в процессе их нагружения уровень усилия N сохранялся постоянным, а усилие P было переменным вплоть до разрушения. Установлено, что при действии только изгибающего момента разрушение образца произошло по неперевязанному сечению каменной кладки при величине $M_{Rd} = 1,0$ кН·м (рис. 6 б). При действии только сжимающего усилия разрушение произошло в результате образования продольных трещин при значении $N_{Rd} = 690$ кН (рис. 6 в). При совместном действии сжимающей силы и изгибающего момента характер разрушения зависел от соотношения этих сил и чаще всего сопровождался раздроблением наиболее сжатой зоны образцов (рис. 6 г).



а)



б)



в)



г)

Рис. 6. Испытание образца кирпичной кладки: а — вид испытательного стенда; б — характер разрушения образцов при изгибе; в — характер разрушения образцов при сжатии; г — характер разрушения образцов при сжатии с изгибом [10]

Численный анализ осуществлялся с использованием комплекса конечно-элементного моделирования высокого уровня. При этом расчетная схема модели (рис. 7) соответствовала схеме лабораторных испытаний образцов (рис. 5).

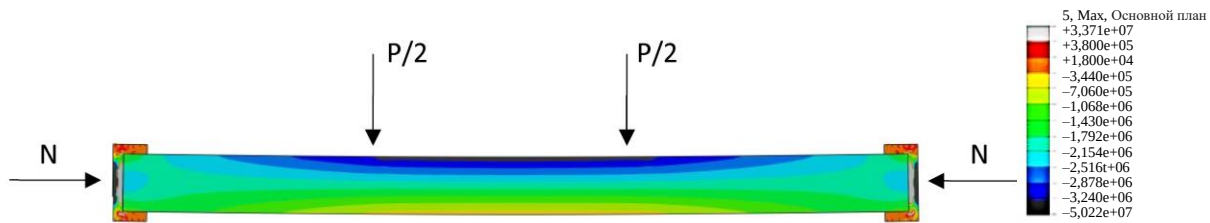


Рис. 7. Расчетное напряженное состояние образца при одновременном действии сжимающего усилия $N = 120$ кН и изгибающего момента $M = 1,24$ кНм [10]

Расчетная модель предусматривала возможность образования трещины в зоне наибольших растягивающих напряжений и их развития по высоте сечения. Кроме того, учитывалось развитие пластических деформаций каменной кладки в сжатой зоне сечения над трещиной. В ходе решения задачи для каждого уровня нагружения, составляющего $N = 10$ кН и $P = 0,05$ кН, корректировались модуль деформаций материала и высота развития трещины. Модуль деформаций кладки назначался в соответствии с экспериментальной зависимостью σ – ε , полученной в результате испытаний стандартных образцов на сжатие вплоть до разрушения (рис. 8 а, б). Прочность на разрыв перпендикулярно растворным швам кладки определялась путем испытаний на растяжение образцов из двух кирпичей, соединенных между собой раствором швом (рис. 8 в).

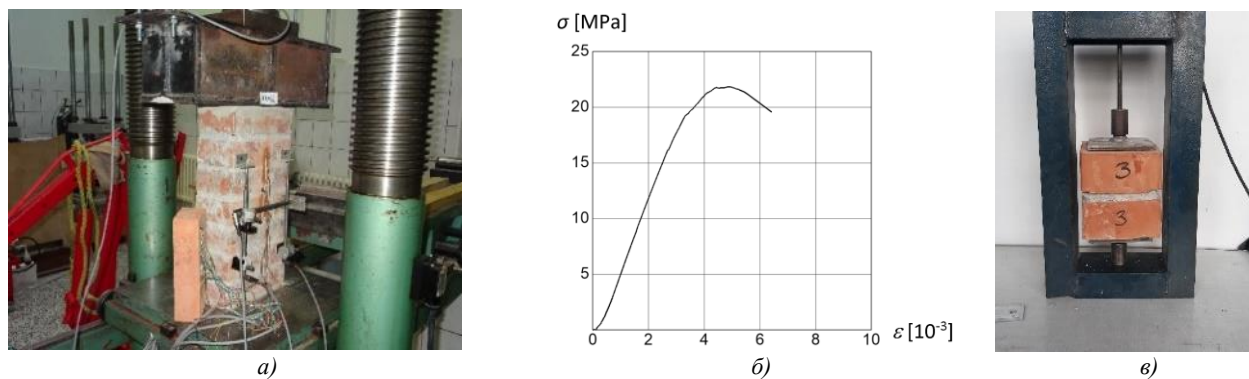


Рис. 8. Испытание образцов каменной кладки: а, б — на сжатие; в — на растяжение поперек растворных швов [10]

Интеракционная зависимость между экспериментальными значениями M_{Rd} и N_{Rd} представлена на рис. 9 в виде аппроксимирующей кривой 1. На этом же рисунке в виде кривой 2 представлена аппроксимация результатов численных исследований.

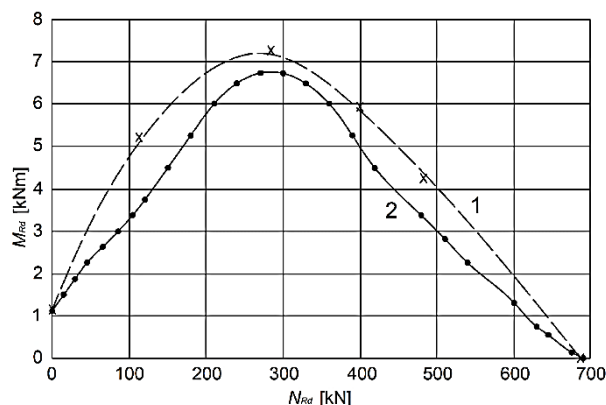


Рис. 9. Интеракционные зависимости M_{Rd} – N_{Rd} образцов каменной кладки при сжатии с изгибом: 1 — экспериментальные; 2 — теоретические [10]

Из приведенных исследований следует, что значения несущей способности экспериментальных образцов оказались на 10–25 % выше результатов численного моделирования. Это связано с неучетом в расчетной модели объемного напряженного состояния сжатой зоны сечения с трещиной при его пластическом деформировании.

Из анализа зависимости $M_{Rd}-N_{Rd}$ следует, что увеличение сжимающего усилия до уровня $N < 0,4N_{Rd}$ нейтрализует отрицательное влияние изгибающего момента, вызывающего образование трещин по перевязанному сечению каменной кладки. При значениях $N > 0,4N_{Rd}$ доминирующими являются сжимающие напряжения, концентрация которых в наиболее сжатой зоне сечения приводит к раздроблению кладки в этой зоне.

Обсуждение и заключение. Выполненный комплекс исследований позволяет сделать вывод, что интеракционный метод может применяться для оценки несущей способности сводчатых конструкций при их расчете в стержневой постановке и при наличии в них трещин. Саму интеракционную зависимость возможно получить на численной твердотельной модели (прямолинейная призма с возможностью комбинирования значений M и N), что подтверждается результатами ее экспериментальной верификации.

Алгоритм оценки несущей способности свода следующий. Предварительно выполняется ряд относительно несложных испытаний кладки, по результатам которых «настраивается» численная твердотельная модель. Далее в модели варьируются значения продольной и поперечной сил и, опираясь на результаты испытаний, строится интеракционная зависимость $M_{Rd}-N_{Rd}$. Отдельно строится модель свода в стержневой постановке. Определенная расчетная ситуация дает комбинации значений $M-N$ по длине дуги свода. Оценка несущей способности свода вплоть до его физического разрушения ведется путем сопоставления определенной комбинации $M-N$ с кривой интеракционной зависимости $M_{Rd}-N_{Rd}$.

Список литературы / References

1. Пашкин Е.М., Бессонов Г.Б. *Диагностика деформации памятников архитектуры*. Москва: Стройиздат; 1984. 150 с. URL: <https://www.restsouz.ru/upload/biblio/Pashkin-E-M-Bessonov-G-B-Diagnostika-deformacii-pamyatnikov-arhitektury.pdf> (дата обращения: 03.02.2026).
2. Pashkin EM, Bessonov GB *Diagnostics of Deformation of Architectural Monuments*. Moscow: Stroyizdat; 1984. 150 p. (In Russ.) URL: <https://www.restsouz.ru/upload/biblio/Pashkin-E-M-Bessonov-G-B-Diagnostika-deformacii-pamyatnikov-arhitektury.pdf> (accessed: 03.02.2026)
3. Орлович Р.Б., Зимин С.С. Резервы несущей способности каменных распорных конструкций. *Строительные материалы*. 2023;9:32–37. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>
4. Orlovich RB, Zimin SS Reserves of Load-Bearing Capacity of Stone Spacer Structures. *Building Materials*. 2023;9:32–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>
5. Физдель И.А. *Дефекты в конструкциях, сооружениях и методы их устранения*. М.: Стройиздат; 1987. Fizdel IA *Defects in Constructions, Structures and Methods of their Elimination*. Moscow: Stroyizdat; 1987. (In Russ.)
6. Павлов В.В., Харьков Е.В. Восстановление работоспособности каменных арок и сводов. *Вестник гражданских инженеров*. 2017;6(65):65–70. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-65-70>
7. Pavlov VV, Khor'kov EV Structural Rehabilitation of Masonry Arches and Vaults. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017;6(65):65–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2017-14-6-65-70>
8. Jasieńko J, Tomasz Ł, Rapp P *Naprawa, konserwacja i wzmacnianie wybranych, zabytkowych konstrukcji ceglanych*. Wrocław: Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne; 2006. (In Polish)
9. Nowak R, Orłowicz R Selected Problems of Failures and Repairs of Historic Masonry Vaults. *MATEC Web of Conferences*. 2019;284:05008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928405008>
10. Furtado A, Rodrigues H, Arêde A, Varum H Experimental Characterization of the In-Plane and Out-of-Plane Behaviour of Infill Masonry Walls. *Procedia Engineering*. 2015;114:862–869. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.041>
11. Hendry AW, Sinha BP, Davies SR *Design of Masonry Structures*. London: EFN Spon; 1997. 279 p. URL: <https://thearchiblog.wordpress.com/wp-content/uploads/2011/02/architecture-ebook-design-of-masonry-structures.pdf> (accessed: 03.02.2026)
12. Dunjic V, Rudisch A, Wittner V, Malcher B, Kolbitsch F *Traglast von historischen gemauerten Gewölben des Hochbaus unter Anwendung der Exzentrizitätsdiagramme*. Mauerwerk; 2017. (in German)
13. Орлович Р.Б., Зимин С.С. Оценка технического состояния исторических каменных зданий. С-Пб: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС; 2024.
14. Orlovich RB, Zimin SS Assessment of the Technical Condition of Historical Stone Buildings. S-Pb: POLYTECH-PRESS; 2024. (In Russ.)

Об авторах:

Зимин Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент инженерно-строительного института Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. (195251, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9152-1010), zimin_sergei@mail.ru

Орлович Роман Болеславович, доктор технических наук, профессор, научный консультант ООО «ПИ Георекострукция» (190005, Российская Федерация, г. Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4), orlowicz@mail.ru

Данилов Сергей Васильевич, кандидат технических наук, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета. (212000, Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-2901), danilov2901@mail.ru

Москалькова Юлия Георгиевна, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства Белорусско-Российского университета. (212000, Беларусь, г. Могилев, пр-т Мира, 43), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-2901), julia43@tut.by

Заявленный вклад соавторов:

С.С. Зимин: проведение расчетов, подготовка текста и графических материалов;

Р.Б. Орлович: формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство;

С.В. Данилов: анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов;

Ю.Г. Москалькова: анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Sergej S. Zimin – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. (29 Polytechnicheskaya Str., St. Petersburg, 195251, Russian Federation), [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-2901), zimin_sergei@mail.ru

Roman B. Orlovich – Dr.Sc. (Eng.), Professor, Scientific consultant of the company LLC «PI Georekonstrukciya». (4 Izmailovsky Ave., St. Petersburg, 195251, Russian Federation) orlowicz@mail.ru

Sergei V. Danilov – Cand.Sci. (Eng.), Head of the Department of Industrial and Civil Construction of the Belarusian-Russian University (43 Mira Ave., Mogilev, 212000, Belarus) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-2901), danilov2901@mail.ru

Yuliya G. Maskalkova – Cand.Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Industrial and Civil Construction of the Belarusian-Russian University (43 Mira Ave., Mogilev, 212000, Belarus) [ORCID](https://orcid.org/0000-0001-9151-2901), julia43@tut.by

Claimed contributorship:

SS Zimin: carrying out the calculations, preparing the manuscript and graphic materials;

RB Orlovich: formation of the basic concept, aims of the research, scientific supervision;

SV Danilov: analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions;

YuG Maskalkova: analysis of the research results, revision of the manuscript, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of manuscript.

Поступила в редакцию / Received 04.02.2026

Поступила после рецензирования / Reviewed 19.02.2026

Принята к публикации / Accepted 06.03.2026