

УДК 692.21

ПРОЧНОСТЬ ИСТОРИЧЕСКОГО КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА ПРИ СЖАТИИ ПОД РАЗЛИЧНЫМИ УГЛАМИ К ОПОРНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

П. И. Матяс¹, В. Н. Деркач²

¹ Ведущий инженер-конструктор, Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», аспирант, УО «Брестский государственный технический университет», Брест, Беларусь, e-mail: matyas.ntc@gmail.com

² Д. т. н., профессор, иностр. член РААСН, директор, Филиал НТЦ РУП «СТРОЙТЕХНОРМ», Брест, Беларусь, e-mail: v-derkach@yandex.ru

Реферат

Степень анизотропии механических характеристик кирпича зависит от технологических процессов, которые совершенствовались на протяжении истории его производства. Исследовалась анизотропия прочности на сжатие трех видов исторического керамического кирпича, произведенного во второй половине XIX – начале XX века. Отбор кирпича выполнялся из каменной кладки сооружений Брестской крепости. Приведены результаты экспериментальных исследований прочности на сжатие кирпича при действии сжимающего усилия под различными углами к его опорной поверхности. Определение степени анизотропии прочности на сжатие производилось на основании испытаний сжимающей нагрузкой образцов-кубов с ребром 40 мм, выпиленных из тела кирпичей под углами к нормали к опорной поверхности 0°, 22,5°, 45°, 67,5°, 90°. Разрушение опытных образцов носило хрупкий характер и проявлялось в виде образования трещин, параллельных направлению сжимающего усилия с последующим раскалыванием образца и образовыванием пирамиды, с отрывом боковых граней. Для всех видов испытанных кирпичей минимальное значение прочности на сжатие получено при угле 22,50. Указанное значение оказалось ниже значения прочности в направлении ортогональном опорной поверхности кирпича на 13–26 %. Выявленная анизотропия прочности на сжатие кирпича, объясняется технологией его производства и ориентацией частиц глинистых минералов в исходном материале. Степень анизотропии прочностных характеристик кирпича ручной формовки существенно выше, чем кирпича, изготовленного механизированным методом. Полученные результаты следует учитывать при расчете методом конечных элементов ответственных фрагментов или узлов исторических каменных конструкций при раздельном учете в расчетной модели каменной кладки кирпича и растворных швов.

Ключевые слова: каменная кладка, исторический керамический кирпич, прочность на сжатие, анизотропия прочности.

COMPRESSIVE STRENGTH OF HISTORICAL CERAMIC BRICK UNDER DIFFERENT ANGLES TO THE BEARING SURFACE

P. I. Matyas, V. N. Derkach

Abstract

The degree of anisotropy of the mechanical characteristics of brick depends on the technological processes that have been improved throughout the history of its production. The anisotropy of compressive strength was studied for three types of historical ceramic bricks manufactured in the second half of the 19th – early 20th centuries. The bricks were taken from the masonry of the structures of the Brest Fortress. The results of experimental studies on the compressive strength of brick under a compressive force applied at various angles to its bearing surface are presented. The degree of anisotropy of compressive strength was determined based on compressive load tests of 40 mm cube specimens cut from the brick body at angles of 0°, 22.5°, 45°, 67.5°, and 90° to the normal to the bearing surface. The failure of the test specimens was brittle in nature and manifested itself in the formation of cracks parallel to the direction of the compressive force, followed by splitting of the specimen, the formation of a pyramid, and the detachment of the side faces. For all types of bricks tested, the minimum compressive strength value was obtained at an angle of 22.5°. This value was found to be 13–26 % lower than the strength value in the direction orthogonal to the bearing surface of the brick. The revealed anisotropy of the compressive strength of brick is explained by the production technology and the orientation of clay mineral particles in the original material. The degree of anisotropy of the strength characteristics of handmoulded bricks is significantly higher than that of bricks manufactured by mechanized methods. The obtained results should be taken into account when calculating critical fragments or nodes of historical masonry structures using the finite element method, with separate consideration of bricks and mortar joints in the computational model of the masonry.

Keywords: masonry, historical ceramic brick, compressive strength, strength anisotropy.

Введение

Напряженно-деформированное состояние (НДС) каменных конструкций исторических зданий в настоящее время, как правило, определяют на основе расчетов методом конечных элементов при помощи современных вычислительных комплексов. В численных моделях каменных конструкций, в зависимости от уровня детализации, каменная кладка может быть представлена макромеханической (далее – макромоделю) или микромеханической (далее – микромоделю) моделями [1–5].

В макромоделях каменную кладку рассматривают как однородный (однородный) материал, наделенный обобщенными деформационными характеристиками кирпича и раствора, которые определяют по результатам предварительно выполненных испытаний образцов кладки при простых видах напряженного состояния. Доступность применения данной модели сочетается с невозможностью представления о локальных особенностях взаимодействия кирпича и растворных швов. Достоинством данной модели является то, что

сетка конечных элементов (КЭ) не привязана к форме и размерам камня и не определяется расположением растворных швов в кладке.

Предположение об однородности каменной кладки может быть ошибочным в случае выполнения численного анализа НДС ответственных фрагментов или узлов каменных конструкций. В этом случае используют метод микромоделирования каменной кладки, согласно которому ее рассматривают как конструкцию или гетерогенное (неоднородное) тело, состоящее из кирпичей и растворных швов, характеристики жесткости и прочности которых учитываются раздельно. В КЭ модели каждый кирпич и растворный шов заменяется совокупностью мелких КЭ. В ряде случаев вводятся дополнительные КЭ нулевой толщины, которые учитывают особые свойства контактных поверхностей между кирпичом и растворными швами (прочность нормального и касательного сцепления, силы трения). Микромодель позволяет выявить особенности распределения напряжений в растворных швах и кирпичах. Она наиболее полно представляет контактное взаимодействие материалов каменной

кладки и может отражать локальные нарушения сцепления, проскальзывание или разрыв между раствором швом и кирпичом. В отличие от макромоделей микромоделей в явном виде учитывает анизотропию и нелинейность деформационных свойств каменной кладки. В микромоделях кирпичи обычно представляются как линейно упругие КЭ, а нелинейное поведение кладки при действии сдвигающих, растягивающих или сжимающих усилий моделируется контактными КЭ и КЭ растворных швов. При выполнении численных расчетов с использованием микромоделей принципиально важным является набор исходных данных, включающих корректные и обоснованные значения механических характеристик кирпича и растворных швов.

Каменные конструкции исторических зданий в основном подвержены сжимающим усилиям. При действии нагрузок или вынужденной деформации, например, при неравномерной осадке фундаментов, возникающие в каменной кладке силовые потоки могут быть направлены под различными углами к горизонтальным растворным швам. В каменной кладке кирпич является основным конструктивным эле-

ментом, прочность на сжатие которого оказывает ключевое влияние на прочность каменной кладки. Собственные исследования [6–7] и исследования ряда других авторов [8–12] показывают, что материал керамического кирпича обладает анизотропными свойствами. При этом степень анизотропии механических характеристик кирпича зависит от технологических процессов, которые совершенствовались на протяжении истории его производства. Вопрос анизотропии механических характеристик исторического кирпича, в частности его прочности на сжатие, малоизучен, что определяет актуальность настоящей статьи.

Материалы и методы

С целью получения данных о степени анизотропии прочности на сжатие исторического керамического кирпича при действии сжимающего усилия под различными углами к опорной поверхности были выполнены исследования кирпичей, отобранных из каменной кладки сооружений Брестской крепости. На опорной поверхности кирпичей нанесены клейма БЛК 1905, БЛК 1864, ASIS KA (рисунок 1).



Рисунок 1 – Общий вид исторического кирпича, отобранного для испытаний

Аббревиатура «БЛК» означает Брест-Литовская крепость, числа 1864 и 1905 указывают на конкретный год выпуска партии. Данный кирпич изготавливался на казенном кирпичном заводе, который располагался в деревне Гершоны в окрестностях Брест-Литовска. Указанный завод выпускал кирпичи с клеймом «БЛК» с 1864 г. по 1911 г. На опорной поверхности кирпича с клеймом ASIS KA нанесено шесть точек в виде неглубоких отверстий, которые возможно являются счетными метками, для фиксации количества выпускаемой продукции в сотнях или тысячах штук.

Кирпичи имели следующие размеры: длина – 265–267 мм, ширина – 132–134 мм, высота – 65–67 мм. Этим размерам соответствует керамический кирпич, производимый согласно указаниям «Правил для единообразной и прочной выделки кирпича, долженствующего употребляться как в С-Петербурге, так и в других местах России, на казенных и частных заводах», которые были изданы в 1848 г. В Правилах указано, что для отличия продукции разных заводов «на каждом кирпиче должно быть непременно клеймо того завода, на котором он выделан».

Предварительно кирпичи были испытаны на сжатие и изгиб. Подготовка кирпичей к испытаниям и их испытания выполнялись в соответствии с ГОСТ 8462. Кроме значений прочности на сжатие и растяжение при изгибе определялась плотность материала кирпичей. Средние значения физико-механических характеристик кирпича приведены в таблице 1.

Анизотропия прочности на сжатие кирпича при действии сжимающего усилия под различными углами к опорной поверхности устанавливалась на основании испытаний, выпиленных из тела кирпича кубов с размером ребра 40 мм. Схема выпиливания образцов-кубов и их общий вид приведены на рисунке 2.

Для каждого испытания из кирпичей изготавливалось не менее пяти керамических образцов-кубов. Грани куба, контактирующие с плитами пресса, выравнивались тонким слоем гипсового раствора.

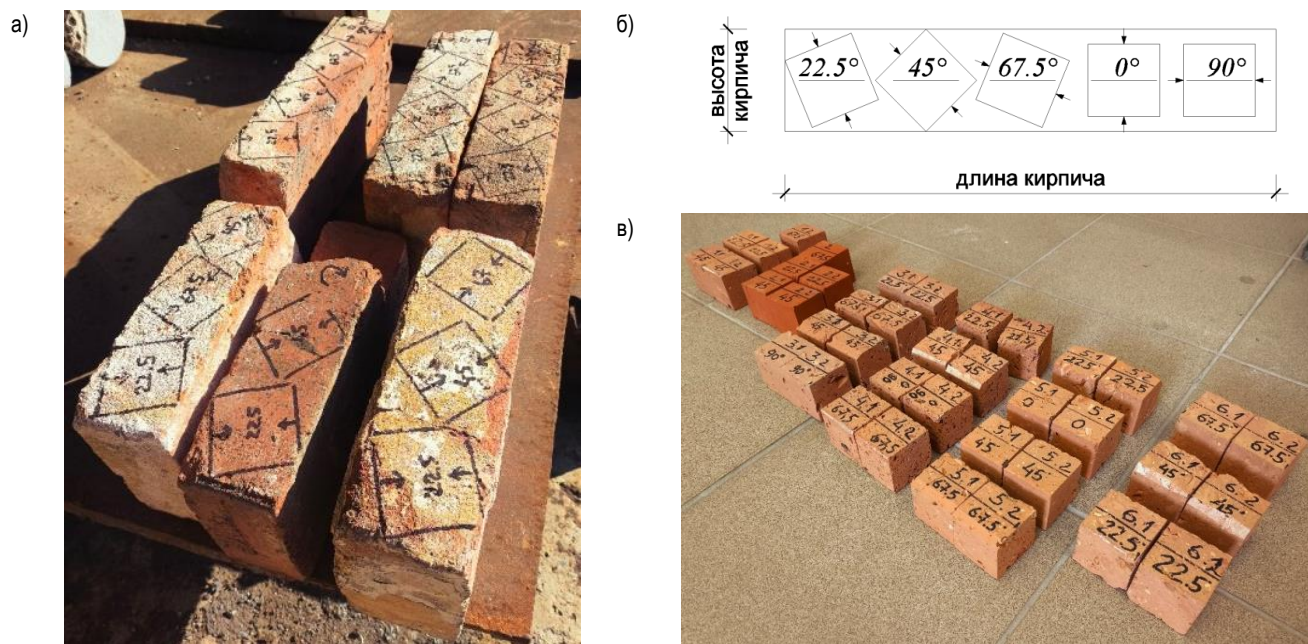
Таблица 1 – Результаты испытаний кирпича

Вид кирпича	Прочность на сжатие f_b (МПа)	Прочность на растяжение при изгибе $f_{лв}$ (МПа)	Плотность ($кг/м^3$)
БЛК 1905	11,1	3,9	1625
БЛК 1864	10,9	4,3	1712
ASIS KA	10,4	4,1	1550

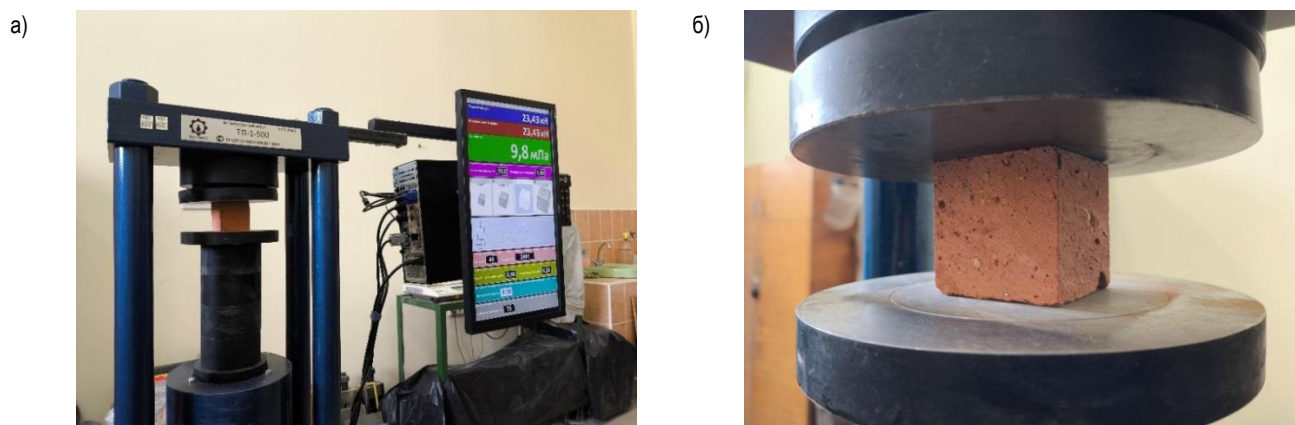
Испытание на сжатие опытных образцов-кубов производилось при помощи испытательного пресса ТП-1-500. Керамические кубы устанавливались одной из выбранных граней на нижнюю опорную плиту пресса центрально относительно его продольной оси. После установки образца на опорную плиту, верхняя плита пресса совмещалась с верхней опорной гранью образца, так, чтобы их плоскости полностью прилегали одна к другой. Нагружение образца производилось непрерывно, со скоростью, обеспечивающей его разрушения в пределах 30 секунд. Общий вид керамического образца-куба в испытательной установке и характер его разрушения показаны на рисунке 3.

Максимальное усилие, достигнутое в процессе испытаний, принималось за разрушающую нагрузку. Прочность на сжатие образца определялась, как частное от деления разрушающей нагрузки на рабочую площадь его поперечного сечения. По результатам испытаний образцов-кубов определялись средние значения прочности на сжатие кирпича под углами $\theta = 0^\circ, 22,5^\circ, 45^\circ, 67,5^\circ, 90^\circ$ к нормали к его опорной поверхности (рисунок 4).

При угле $\theta = 0^\circ$ нагрузка приложена перпендикулярно к опорной поверхности кирпича, что характерно для большинства случаев работы каменной кладки, а при $\theta = 90^\circ$ перпендикулярно торцевой поверхности кирпича.



а) разметка кирпича; б) схема выпиливания; в) опытные образцы-кубы
Рисунок 2 – Образцы-кубы для испытаний на сжатие



а) общий вид испытаний; б) характер разрушения
Рисунок 3 – Испытания образцов-кубов

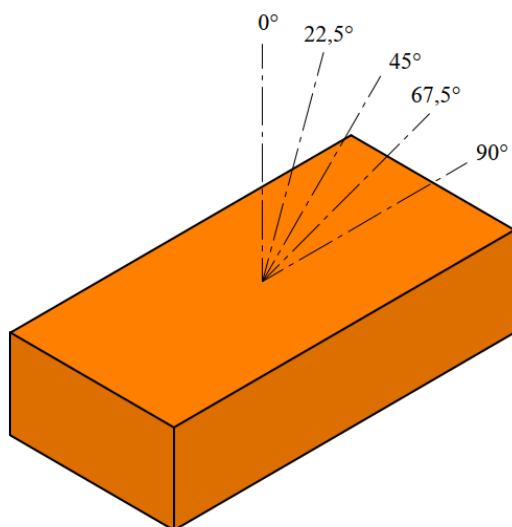


Рисунок 4 – Углы определения прочности на сжатие кирпича

Результаты исследования

Разрушение опытных образцов в подавляющем большинстве случаев носило хрупкий характер и проявлялось в виде образования трещин, параллельных направлению сжимающего усилия с последующим раскалыванием образца. При этом в верхней и нижней частях образца под воздействием сил трения между плитами прессы и гранями куба образовывались пирамиды, с отрывом боковых граней. Типичный характер разрушения опытных образцов, показан на рисунке 5.

В таблице 2 приведены средние значения прочности на сжатие керамических образцов-кубов и коэффициенты вариации прочности, полученные по результатам испытаний.



Рисунок 5 – Характер разрушения опытных образцов

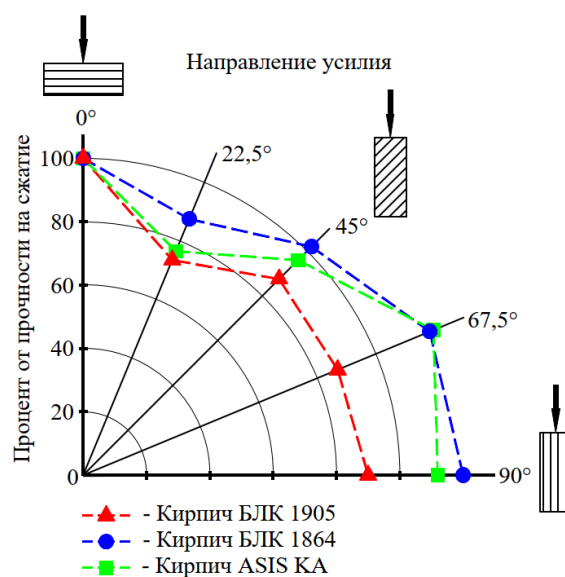
Таблица 2 – Результаты испытаний образцов-кубов

Угол наклона θ°	Количество испытанных образцов n	Среднее значение прочности на сжатие $f_{B(0)}$ (МПа)	Коэффициент вариации V %
Кирпич БЛК 1905			
0	5	18,7	20
22,5	6	13,8	11
45	5	16,4	30
67,5	7	16,3	16
90	5	16,9	32
Кирпич БЛК 1864			
0	5	13,5	19
22,5	5	11,8	23
45	5	13,8	35
67,5	5	16,0	31
90	5	16,2	25
Кирпич ASIS KA			
0	5	17,5	21
22,5	5	13,4	34
45	6	16,8	23
67,5	5	21,0	13
90	6	19,6	15

Из таблицы 2 следует, что для всех кирпичей минимальное значение прочности на сжатие имеет место при угле $\theta = 22,5^\circ$. Прочность кирпича на сжатие при $\theta = 22,5^\circ$ $f_{B(22,5)}$ оказалась ниже значения прочности в направлении ортогональном опорной плоскости $f_{B(0)}$ на 13–26 %. В диапазоне углов $\theta = 22,5^\circ$ – 45° наблюдается увеличение прочности на сжатие. При углах $\theta \geq 45^\circ$ прочность на сжатие кирпича БЛК 1905 оставалась практически постоянной и отличалась в меньшую сторону от прочности на сжатие $f_{B(0)}$ на 10–12 %. Для кирпичей БЛК 1864 и ASIS KA прочность на сжатие при $\theta = 67,5^\circ$ и 90° превышала значение $f_{B(0)}$.

Графическая интерпретация полученных результатов приведена на рисунке 6.

В работе [13] представлены результаты испытаний кернов диаметром 45 мм, которые выбуривались под разными углами к опорной плоскости современного и исторического кирпича. Для исторического кирпича прочность на сжатие под углами $35^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$ на 20–25 % превысила значение прочности $f_{B(0)}$. При этом минимальные значения прочности на сжатие имели место при $\theta = 20^\circ$. Значение прочности на сжатие $f_{B(20)}$, оказалось ниже значения $f_{B(0)}$ на 30 %, что удовлетворительно согласуется с результатами собственных исследований. Для современного кирпича анизотропия прочности на сжатие была менее выражена и при углах $\theta \leq 60^\circ$ отличалась не более чем на 6 % от прочности на сжатие ортогонально опорной поверхности, $f_{B(0)}$.

Рисунок 6 – Графики изменения прочности на сжатие в зависимости от угла θ°

Заключение

Выявленная анизотропия прочности на сжатие кирпича, объясняется технологией его производства и ориентацией частиц глинистых минералов в исходном материале [14–17]. На территории современной Беларуси практически до конца XIX века изготавливался кирпич ручной формовки. Ручная формовка кирпичей производилась в деревянных формах – глину уплотняли, а ее излишки срезали деревянной строганной рейкой. Из-за несовершенства технологии геометрические размеры исторического кирпича не выдерживались. Поверхность такого кирпича обычно имеет шероховатую фактуру с неровными гранями, следами деревянных форм и характеризуется наличием мелких трещин. При разломе кирпича часто наблюдается слоистость материала, каверны и различные минеральные включения [18, 20]. Данные факторы в значительной степени определяют анизотропию прочностных характеристик материала кирпича. По результатам выполненных исследований были получены новые экспериментальные данные об анизотропии прочности на сжатие керамического кирпича, используемого во второй половине XIX – начале XX века при строительстве зданий и оборонительных сооружений Брестской крепости. Установлено, что в диапазоне углов к нормали к опорной поверхности кирпича 0° – $22,5^\circ$ значение прочности на сжатие снижается, а в диапазоне углов $22,5^\circ$ – 90° возрастает. Для испытанных кирпичей значение прочности на сжатие при $\theta = 22,5^\circ$ оказалась ниже, чем в направлении ортогональном опорной поверхности на 13–26 %. Данное обстоятельство рекомендуется учитывать при выполнении численного анализа методом

конечных элементов микромоделей ответственных фрагментов или узлов исторических каменных конструкций.

С конца XIX века в производство кирпича начали внедряться новые технологии, основанные на механизированных процессах подготовки сырья и формовки кирпича. Большое значение имело также внедрение для обжига кирпича туннельных и кольцевых печей. Механический способ подготовки сырья, формовка под давлением, обжиг в стационарных печах при температурах выше 900 °С. позволили получать кирпич более плотной и однородной структуры по сравнению с кирпичом ручной формовки. Прочность кирпича увеличилась, улучшились его физико-механические характеристики, а также уменьшились различия в прочностных характеристиках материала кирпича в зависимости от направления сжимающего усилия [6, 10, 11].

Известно, что при испытании на сжатие образцов кладочных изделий их размеры влияют на результаты испытаний. При испытании на сжатие керамических кубов большое влияние на прочность оказывают силы трения по поверхности, контактирующей с плитами пресса. В связи с этим представляет интерес отношение прочности на сжатие керамических кубов с ребром 40 мм при $\theta = 0^\circ$ к прочности на сжатие кирпича, установленной в соответствии с ГОСТ 8462. Для кирпичей БЛК 1905 и АСИС КА данное значение составило 1,7, для кирпича БЛК 1864 – 1,3.

В работе [17] приведены результаты экспериментальных исследований различных видов керамических кирпичей. Данные исследования подтвердили возможность использования нестандартных кубических образцов размером 40 × 40 × 40 мм для определения прочности кирпичей на сжатие. Образцы-кубы часто являются более предпочтительными, по сравнению с стандартизированными образцами, при оценке прочности на сжатие полнотелых керамических кирпичей в существующих каменных конструкциях. Отмечено, что среди прочих преимуществ образцы-кубы с ребром 40 мм позволяет характеризовать анизотропию прочности на сжатие керамических кирпичей, по результатам испытаний на сжатие. Это особенно актуально для исторических каменных сооружений, когда отбор кладочных изделий ограничен. Исследование [17] показало, что экструированные полнотелые глиняные кирпичи обладают умеренной анизотропией прочности на сжатие, при этом наибольшая прочность наблюдается вдоль направления, перпендикулярного к экструзионной плоскости (это может быть толщина или длина в зависимости от процесса изготовления). Для кирпичей ручной формовки имела место выраженная анизотропия прочности на сжатие, что подтверждается результатами собственных исследований [6].

Список цитированных источников

1. Lourenço, P. B. A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures / P. B. Lourenço, J. G. Rots // *Journal of Structural Engineering*, ASCE. – 1997. – Vol. 123 (7). – P. 660–668.
2. Lourenço, P. B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation / P. B. Lourenço ; Delfi University of Technology, Delfi University Press, The Netherlands. – 1996. – 210 p.
3. Malyszko, L. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uzglednieniem anizotropii / L. Malyszko. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2005. – 157 p.
4. Галалюк, А. В. Математическое моделирование образцов каменной кладки при сжатии / А. В. Галалюк, И. Е. Демчук // *Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС ; редкол.: М. Ф. Марковский [и др.]*. – Минск, 2012. – Вып. 4. – С. 20–29.
5. Демчук, И. Е. Моделирование испытаний образцов каменной кладки при сжатии вдоль горизонтальным раствором швам / И. Е. Демчук, А. В. Галалюк // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. – 2013. – № 1. – С. 122–128.
6. Матяс, П. И. Анизотропия прочности на сжатие керамического кирпича // П. И. Матяс, В. Н. Деркач, А. В. Галалюк // *Вестник Брестского государственного технического университета*. – 2026. – № 1 (139). – С. 59–63. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63.
7. Деркач, В. Н. Каменные и армокаменные конструкции. Оценка технического состояния, ремонт и усиление / В. Н. Деркач. – Минск : СтройМедиа Проект, 2021. – 256 с.
8. Орлович, Р. Б. Оценка технического состояния исторических каменных зданий / Р. Б. Орлович, С. С. Зимин. – СПб. : ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2024. – 209 с.
9. Tkacz, P. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących / P. Tkacz, R. Orłowicz // XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK: Materiały Konferencyjne, Gliwice, 5–8 marca 2019. – Gliwice, 2019. – S. 227–242.
10. Улыбин, А. В. О методах контроля прочности керамического кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков // *Инженерно-строительный журнал*. – № 3. – 2013. – С. 29–34.
11. Стандартная и альтернативная методики определения прочности кирпича при обследовании зданий и сооружений / А. В. Улыбин, С. В. Зубков, О. Ю. Сударь, Е. А. Лаптев // *Строительство уникальных зданий и сооружений*. – 2014. – № 3 (18). – С. 9–24.
12. Matysek, P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących / P. Matysek. – Kraków : Politechnika Krakowska, 2014. – 167 s.
13. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln / A. Krawtschuk, O. Zeman, J. Schellander [et al.] // *Mauerwerk*. – 2014. – № 2. – P. 98–104.
14. Иванова, О. А. Минералогический анализ как основа керамического кирпича / О. А. Иванова, В. А. Клевакин // *Строительные материалы*. – 2010. – № 12. – С. 13–15.
15. Bartusch, R. Laminations in Extrusion / R. Bartusch, F. Händle // *Extrus. Ceram. Eng. Mater. Process*. – Berlin : Springer, 2009. – P. 187–210.
16. Cabané, A. Measurement of Solid Brick Compressive Strength and Anisotropy on Non-Standard Small Cubic Specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // *Structural Analysis of Historical Constructions : SAHC 2023 / ed.: Y. Endo, T. Hanazato*. – Cham : Springer, 2024. – P. 591–602. – (RILEM Bookseries ; vol. 47). – DOI: 10.1007/978-3-031-39603-8_48.
17. Cabané A. Anisotropy and compressive strength evaluation of solid fired clay bricks by testing small specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // *Construction and Building Materials*. – 2022. – Vol. 344. – Art. 128195. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128195.
18. Инчик, В. В. Исследование Петербургского кирпича, изготовленного в VIII–IX вв., прошедшего многолетнюю эксплуатацию / В. В. Инчик // *Вестник гражданских инженеров*. – 2018. – № 4. – С. 107–115.
19. Желдаков, Д. Ю. Определение долговечности строительной керамики / Д. Ю. Желдаков, В. Т. Ерофеев // *Вестник МГСУ*. – 2024. – Т. 19, Вып. 3. – С. 394–402. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402.
20. Желдаков, Д. Ю. Проблемы сохранности и реставрации кирпичной кладки зданий и сооружений / Д. Ю. Желдаков, В. Б. Дорохов // *Современные подходы к сохранению историко-культурного наследия стран СНГ : сб. ст. Междунар. науч. форума, Полоцк, 29 сент.–3 окт. 2025 г. / Полоц. гос. ун-т им. Евфросинии Полоцкой ; под науч. ред. В. Е. Овсейчика*. – Полоцк ; Новополоцк : Полоцкое книжное издательство ; ПГУ им. Е. Полоцкой, 2025. – С. 195–203. – DOI: 10.52928/978-985-531-917-8-2025-195-203.

References

1. Lourenço, P. B. A multi-surface interface model for the analysis of masonry structures / P. B. Lourenço, J. G. Rots // *Journal of Structural Engineering*, ASCE. – 1997. – Vol. 123 (7). – P. 660–668.
2. Lourenço, P. B. Computational strategies for masonry structures: PhD Dissertation / P. B. Lourenço ; Delfi University of Technology, Delfi University Press, The Netherlands. – 1996. – 210 p.
3. Malyszko, L. Modelowanie zniszczenia w konstrukcjach murowych z uzglednieniem anizotropii / L. Malyszko. – Olsztyn : Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2005. – 157 p.
4. Galalyuk, A. V. Matematicheskoe modelirovanie obrazcov kamennoj kladki pri szhatii / A. V. Galalyuk, I. E. Demchuk // *Problemy sovremennogo betona i zhelezobetona: sb. nauch. tr. / In-t BelNIIS ; redkol.: M. F. Markovskij [i dr.]*. – Minsk, 2012. – Vyp. 4. – S. 20–29.

5. Demchuk, I. E. Modelirovanie ispytaniy obrazcov kamennoy kladki pri szhatii vdol' gorizonta'nym rastvornym shvam / I. E. Demchuk, A. V. Galalyuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Stroitel'stvo i arhitektura. – 2013. – № 1. – S. 122–128.
6. Matyas, P. I. Anizotropiya prochnosti na szhatie keramicheskogo kirpicha // P. I. Matyas, V. N. Derkach, A. V. Galalyuk // Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. – 2026. – № 1 (139). – S. 59–63. – DOI: 10.36773/1818-1112-2026-139-1-59-63.
7. Derkach, V. N. Kamennye i armokamennye konstrukcii. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya, remont i usilenie / V. N. Derkach. – Minsk : StrojMedia Proekt, 2021. – 256 s.
8. Orlovich, R. B. Ocenka tekhnicheskogo sostoyaniya istoricheskikh kamennykh zdaniy / R. B. Orlovich, S. S. Zimin. – SPb. : POLITEKH-PRESS, 2024. – 209 s.
9. Tkacz, P. Wybrane sposoby określania wytrzymałości muru w budynkach istniejących / P. Tkacz, R. Orłowicz // XXXIV Ogólnopolskie Warsztaty Pracy Projektanta WPPK: Materiały Konferencyjne, Gliwice, 5–8 marca 2019. – Gliwice, 2019. – S. 227–242.
10. Ulybin, A. V. O metodah kontrolya prochnosti keramicheskogo kirpicha pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenij / A. V. Ulybin, S. V. Zubkov // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – № 3. – 2013. – S. 29–34.
11. Standartnaya i al'ternativnaya metodiki opredeleniya prochnosti kirpicha pri obsledovanii zdaniy i sooruzhenij / A. V. Ulybin, S. V. Zubkov, O. YU. Sudar', E. A. Laptev // Stroitel'stvo unikal'nykh zdaniy i sooruzhenij. – 2014. – № 3 (18). – C. 9–24.
12. Matysek, P. Identyfikacja wytrzymałości na ściskanie i odkształcalności murów ceglanych w obiektach istniejących / P. Matysek. – Kraków : Politechnika Krakowska, 2014. – 167 s.
13. Einfluss der Belastungsrichtung auf die einaxiale Druckfestigkeit von Proben aus Vollziegeln / A. Krawtschuk, O. Zeman, J. Schellander [et al.] // Mauerwerk. – 2014. – № 2. – P. 98–104.
14. Ivanova, O. A. Mineralogicheskij analiz kak osnova keramicheskogo kirpicha / O. A. Ivanova, V. A. Klevakin // Stroitel'nye materialy. – 2010. – № 12. – S. 13–15.
15. Bartusch, R. Laminations in Extrusion / R. Bartusch, F. Händle // Extrus. Ceram. Eng. Mater. Process. – Berlin : Springer, 2009. – P. 187–210.
16. Cabané, A. Measurement of Solid Brick Compressive Strength and Anisotropy on Non-Standard Small Cubic Specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // Structural Analysis of Historical Constructions : SAHC 2023 / ed.: Y. Endo, T. Hanazato. – Cham : Springer, 2024. – P. 591–602. – (RILEM Bookseries ; vol. 47). – DOI: 10.1007/978-3-031-39603-8_48.
17. Cabané A. Anisotropy and compressive strength evaluation of solid fired clay bricks by testing small specimens / A. Cabané, L. Pela, P. Roca // Construction and Building Materials. – 2022. – Vol. 344. – Art. 128195. – DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128195.
18. Inchik, V. V. Issledovanie Peterburgskogo kirpicha, izgotovlenno go v VIII–IX vv., proshedshego mnogoletnyuyu ekspluatatsiyu / V. V. Inchik // Vestnik grazhdanskih inzhenerov. – 2018. – № 4. – S. 107–115.
19. Zheldakov, D. YU. Opredelenie dolgovechnosti stroitel'noj keramiki / D. YU. Zheldakov, V. T. Erofeev // Vestnik MGSU. – 2024. – T. 19, Vyp. 3. – S. 394–402. – DOI: 10.22227/1997-0935.2024.3.394-402.
20. Zheldakov, D. YU. Problemy sohrannosti i restavratsii kirpichnoj kladki zdaniy i sooruzhenij / D. YU. Zheldakov, V. B. Dorohov // Sovremennye podhody k sohraneniyu istoriko-kul'turnogo naslediya stran SNG : sb. st. Mezhdunar. nauch. foruma, Polock, 29 sent.– 3 okt. 2025 g. / Poloc. gos. un-t im. Evfrosinii Polockoj ; pod nauch. red. V. E. Ovsejchika. – Polock ; Novopolock : Polockoe knizhnoe izdatel'stvo ; PGU im. E. Polockoj, 2025. – S. 195–203. – DOI: 10.52928/978-985-531-917-8-2025-195-203.

Материал поступил 16.05.2026, одобрен 08.06.2026,
принят к публикации 08.06.2026