Строительные материалы и изделия

УДК 692.2

© Ю. А. Беленцов, д-р техн. наук, профессор
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: belents@mail.ru

© А. М. Харитонов, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: peepdv@mail.ru

© А. П. Лейкин, канд. техн. наук, доцент
(Петербургский государственный университет
путей сообщения Императора Александра I,
Санкт-Петербург, Россия)

E-mail: alezz@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2021-18-4-79-85

© Yu. A. Belentsov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: belents@mail.ru

© A. M. Kharitonov, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University
of Architecture and Civil Engineering,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: peepdv@mail.ru

© A. P. Leykin, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Emperor Alexander I St. Petersburg
State Transport University,
St. Petersburg, Russia)

E-mail: alezz@mail.ru

ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КЛАДКИ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ

EVALUATION OF THE BEARING CAPACITY OF THE HISTORICAL BUILDINGS' MASONRY

Определение надежности кирпичных конструкций исторических зданий, как правило, выполняется на основе расчетов по эмпирическим формулам, в которых используются характеристики кирпича и кладочного раствора, полученные путем испытания образцов материалов, отобранных из конструкций. Практика выполнения подобных оценок зачастую показывает очевидное несоответствие визуального состояния конструкций и полученных результатов расчетов. Кирпичные кладки, не имеющие признаков потери несущей способности, могут оцениваться как аварийные, а конструкции, явно утратившие свою целостность, признаются достаточно надежными. Существующими нормативными документами предусмотрена возможность использования стандартных образцов для прямого определения прочности кирпичной кладки, но она требует адаптации к условиям обследования исторических объектов. В данной работе представлено обоснование необходимости применения стандартных образцов для определения прочностных параметров кладок исторических зданий.

Ключевые слова: исторические здания, прочность кладки, надежность.

The reliability of historical buildings' brick structures is usually evaluated on the basis of analysis based on empirical formulas that use characteristics of brick and masonry mortar, which are obtained as a result of testing samples of materials taken from the structures. The practice of making such evaluations often shows an obvious discrepancy between the visual state of the structure and the analysis results obtained. Brick-masonry that does not have signs of the load-bearing capacity loss may be evaluated as emergency brick-masonry, and structures that have clearly lost their integrity are sometimes assumed to be sufficiently reliable. The currently valid regulatory documents provide for the possibility of using standard samples for direct evaluation of the strength of brickwork, but it requires adaptation to the conditions of the of historical objects' survey. This paper presents substantiation for the need of using standard samples to evaluate the strength parameters of historical objects' masonry.

Keywords: historical buildings, masonry strength, reliability.

Кирпичная или каменная кладка является основной конструкцией большинства исторических зданий — памятников архитектуры, поэтому неотъемлемой частью инженерно-технического обследования объектов культурного наследия является оценка резервов ее несущей способности. Традиционно при подобных обследованиях для определения прочности кладки используется эмпирическая формула Л. И. Онищика¹:

$$R_u = AR_1(1 - \frac{a}{b + R_2 / 2R_1}), \quad (1)$$

где R_u — предел прочности кладки при сжатии; A — конструктивный коэффициент; R_1 — предел прочности камня при сжатии; R_2 — предел прочности раствора при сжатии; γ — коэффициент, который применяют при определении прочности кладки на растворах низких марок (25 и ниже); a, b — коэффициенты, зависящие от вида кладки.

С помощью конструктивного коэффициента A можно охарактеризовать максимально возможную прочность кладки, так как из формулы (1) следует, что при $R_2 \rightarrow \infty R_u = AR_1$. Коэффициент A определяется в соответствии со следующей формулой:

$$A = \frac{1,2}{1 + R_1 / 3R_{ub}}, \quad (2)$$

где R_{ub} — предел прочности камня при изгибе.

Наличие выявленных дефектов и трещин, образовавшихся в процессе эксплуатации, учитывается снижением несущей способности в зависимости от технического состояния кладки, как показано в табл. 1².

Длительная эксплуатация объектов сопровождается протеканием различных механизмов де-

¹ Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81 «Каменные и армокаменные конструкции. Нормы проектирования») / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР. М.: ВДПП Госстроя СССР, 1989. 152 с.

² Пособие по обследованию строительных конструкций. М.: АО «ЦНИИПРОМЗДАНИЙ», 2004. 275 с.

струкции материалов, следствием чего является потеря однородности кладки (рис. 1). Поэтому, на наш взгляд, использование в расчетах локальных оценок свойств элементов кладки, а также большое количество субъективных поправочных коэффициентов, предусмотренных методикой расчета, не позволяют с достаточной надежностью оценить реальную несущую способность кладки в целом.

Вместе с тем существует методика прямой оценки прочностных показателей кладки, нормированная в ГОСТ 32047–2012 «Кладка каменная. Метод испытания на сжатие»³. Безусловно, в отличие от расчетного подхода, определение прочности кладки путем прямых испытаний стандартных образцов позволяет в явном виде учесть многочисленные факторы, влияющие на свойства конструкций из кирпича и камня: тип кирпича/камня, его размеры, технологию возведения конструкции, способ армирования, ха-

³ ГОСТ 32047–2012. Кладка каменная. Метод испытания на сжатие. М.: Стандартинформ, 2014. 14 с.

Рис. 1. Характерное состояние кладки исторических зданий и сооружений

Таблица 1

Оценка состояния каменных конструкций по внешним признакам

Состояние конструкций	Категория состояния конструкций
I — нормальное	Конструкция отвечает предъявляемым эксплуатационным требованиям
II — удовлетворительное	Несущая способность достаточна
III — неудовлетворительное	Снижение несущей способности кладки до 25 %
IV — предаварийное или аварийное	В конструкциях наблюдаются деформации и дефекты, свидетельствующие о потере ими несущей способности свыше 50 %

рактические характеристики кладочного раствора, квалификации каменщика и т. п. Оценка прочности при испытании стандартных образцов производится с обеспеченностью уровня достоверности 95 %, что обусловлено схемой испытания, рациональным выбором размеров и количеством образцов (не менее пяти).

Таким образом, необходима выработка принципов оценки несущей способности кладки длительно эксплуатируемых зданий на основе испытания стандартных образцов с адаптацией нормативной методики под задачи сохранения объектов культурного наследия, что позволит обеспечить требуемый уровень надежности реставрационного проектирования.

При выполнении прямых испытаний величина масштабного коэффициента применительно к используемому образцу представляет собой ключевой вопрос. Поэтому первой методологической задачей является назначение геометрических размеров стандартных образцов и их количества. Здесь необходимо учитывать, что отбор образцов из существующих исторических конструкций требует значительных затрат и сопровождается ограничениями, связанными с недопущением чрезмерного травмирования памятника архитектуры.

При назначении размеров образцов необходимо исходить из положения, что геометриче-

ские параметры образца кладки в плане должны обеспечивать перераспределение внутренних усилий между кирпичом, горизонтальными и вертикальными швами кладки, а их количество и обработка результатов — гарантировать достоверность полученной информации. Это подразумевает, что количество рядов кладки в образце не может быть менее четырех.

В ходе проведенных ранее исследований установлено [1], что увеличение высоты образца и количества рядов в нем сопровождается снижением предела прочности при сжатии. Обобщенные результаты проведенных исследований сведены в табл. 2 и в графическом виде представлены на рис. 2.

Размеры образца в плане должны быть минимально возможными, но при этом необходимо

Таблица 2

Влияние количества рядов кирпича на прочность образца кладки

Количество рядов кладки в образце	Коэффициент влияния увеличения количества рядов в образце кладки, $K_{\text{ряд}}$
1	1
2	0,53
3	0,45
4	0,4
5	0,37

Рис. 2. Степень влияния на прочность количества рядов в образце кладки

Таблица 3

Масштабные коэффициенты для образцов кладки

Сечение образца в плане, мм	Масштабный коэффициент $K_{\text{масш}}$ в зависимости от вида кладочного раствора	
	Сложный (известково-цементный), цементный	Известковый
380 × 380	1	1
250 × 250	1,28	1,24
250 × 120	1,72	1,61
120 × 120	1,15	–

сохранить проявление растягивающих поперечных усилий, аналогичных тем, которые возникают в реальных условиях конструкций. Толщина кладки стен обычно составляет от 1 до 2,5 кирпича, что и определяет размеры образца в плане.

При этом необходимо учитывать масштабный коэффициент поперечного сечения, так как прочность элементов кладки существенно зависит от размеров образца, что подтверждается результатами многочисленных работ ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.

Масштабные коэффициенты, отражающие снижение прочности кладки относительно величин, определенных на образцах размером 380 × 380 мм в плане с учетом вида кладочного раствора, установлены С. В. Поляковым⁴ [2] и представлены в табл. 3.

Следует отметить, что согласно данным С. В. Полякова при переходе от образцов 380 × 380 мм к образцам 250 × 250 мм однородность результатов испытаний снижается на 13 %.

Исходя из вышесказанного, а также учитывая технологические возможности, образцы кладки для прямых испытаний на прочность предпочтительно отбирать методом бурения по оси приложения нагрузки. Размер в плане образца должен быть не менее 250 мм, а высота образца — более четырех рядов кладки. Внешний вид образцов, отбираемых согласно предлагаемым принципам, представлен на рис. 3.

Предлагаемые принципы определения прочности кладки при сжатии с использованием образцов, отобранных из конструкции, апробированы на объекте в Санкт-Петербурге. Для испытаний из кладки было выбурено два образца-керна диаметром 290 мм и высотой в четыре ряда кирпича (343 и 360 мм). Большее количество об-

разцов отобрать не представлялось возможным ввиду текущего состояния конструкций.

Кроме этого, из кладки были отобраны образцы кирпича (керны и кубы), а также раствора для определения их характеристик с последующим использованием полученных данных при оценке прочности конструкции расчетным методом.

Также кирпич испытывался стандартным методом с использованием полноразмерных образцов по ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические». Сравнение полученных результатов представлено в табл. 4.

Результаты испытаний (см. табл. 4) свидетельствуют о том, что кирпич по прочности соответствует марке М100. Использование различных видов образцов применительно к оценке прочности керамического кирпича характеризуется чрезмерно высокой неоднородностью результатов и значительным отклонением от значений, полученных стандартным методом испытания.

Рис. 3. Вид образца-керна кирпичной кладки для прямых испытаний на прочность

⁴ СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*. М.: ФЦС, 2012. 82 с.

Таблица 4

**Результаты определения предела прочности полнотелого керамического кирпича
при использовании образцов различного вида**

Вид образца	Количество образцов, шт.	Предел прочности, МПа		Отклонение от прочности стандартных образцов, %
		при изгибе	при сжатии	
Керн, диаметром 50 мм	10	–	20,2	26
Кубы 50 × 50 × 50 мм	5	–	41,6	156
Стандартные образцы	5	6,12	16	–

Определение прочности раствора проводилось разрушающим методом с использованием образцов, отобранных из горизонтальных швов кладки (согласно ГОСТ 5802–86). Общий вид подготовленных к испытанию образцов раствора представлен на рис. 4, результаты определения прочности сведены в табл. 5.

Согласно результатам испытаний кладочный раствор соответствует по прочности марке М100.

Полученные значения прочности кирпича и кладочного раствора использовались для расчетной оценки несущей способности кладки. Кроме этого выполнены прямые испытания образцов-кернов кладки со статистической оценкой результатов при уровне достоверности $p = 0,95$ согласно требованиям ГОСТ Р 50779.22–2005⁵. Сравнение полученных значе-

ний расчетной и экспериментальной прочности кладки представлено в табл. 6.

Масштабный коэффициент принят равным единице, поскольку размеры образца соответствуют рассмотренным выше требованиям. Гарантированное значение прочности кладки вычислялось на основе размаха и доверительной вероятности по следующей формуле (ГОСТ Р 50779.22–2005):

$$m > R_{cp} - q_{1-\alpha} W, \quad (3)$$

где $q_{1-\alpha}$ — доверительная вероятность для одностороннего доверительного интервала, $q_{1-\alpha} = 3,157$ для выборки из двух образцов при $p = 0,95$ (по табл. А.1 СП 15.13330.2012); W — размах выборки, $W = 1$.

Расчетная прочность кладки определена по формуле

$$R_n = \frac{\bar{R}}{K_{зап}}, \quad (4)$$

где $K_{зап}$ — коэффициент запаса, который для здания повышенного уровня ответственности составляет $K_{зап} = 6,1$ [4].

При указанном коэффициенте запаса вероятность отказа составит $P_f = 2,5 \cdot 10^{-5}$ [3–5], а индекс надежности $\beta = 4,048$ [4].

Выводы

Исходя из полученных результатов можно заключить, что оценка резервов несущей способности кирпичной кладки исторических зданий прямым методом с использованием образцов кладки, отобранных из конструкций, характеризуется высокой надежностью с малой вероятностью наступления отказа конструкции. Полученный уровень надежности согласуется с требованием европейских норм, предъявляемым к конструкциям повышенной ответственности.

Величины расчетных значений прочности кладки, установленные на основе испытаний образцов кирпича и раствора, могут быть завы-

Рис. 4. Вид образцов раствора, подготовленных к испытанию

⁵ ГОСТ Р 50779.22–2005 (ИСО 2602:1980). Статистические методы. Статистическое представление данных. Точечная оценка и доверительный интервал для среднего. М.: ФГУП «Стандартинформ», 2005. 8 с.

Таблица 5

Результаты определения предела прочности при сжатии кладочного раствора

Вид образца	Количество образцов, шт.	Масштабный коэффициент $K_{\text{масш}}$	Среднее значение прочности $R_{\text{ср}}$, МПа
Кубы $40 \times 40 \times 40$ мм	5	0,8	10,98

Таблица 6

Результаты определения предела прочности при сжатии кладки

Метод определения	Предел прочности при испытании образцов кладки, МПа	Гарантированная величина прочности с обеспеченностью 95 %, МПа	Расчетный предел прочности при сжатии, МПа	Отклонение расчетных значений от эмпирических, %
Расчетный	–	–	1,8	20
Экспериментальный	9,1*	$9,1 - 3,157 \cdot 1 = 5,94$	$9,1 / 6,1 = 1,49$	–

* Среднее арифметическое значение по двум образцам.

шенными по сравнению с результатами прямых испытанной кладки на 20 % и более. Это существенно снижает уровень надежности оцениваемых конструкций по показателю вероятности отказа. Кроме этого, использование для определения прочности кирпича образцов-кернов или кубов вносит дополнительную неопределенность. Отмечены существенные расхождения результатов испытаний указанных образцов относительно данных, полученных в соответствии со стандартной методикой определения марки кирпича.

На снижение уровня надежности оценки прочности кладки при использовании расчетной методики указывают величины коэффициента запаса $K_{\text{зап}} = 5,05$ и вероятности отказа $P_f = 2,3 \cdot 10^{-4}$, а также индекса надежности $\beta = 3,49$ [4]. Данные значения вполне приемлемы при проектировании конструкций рядовых зданий и сооружений, но недостаточны в отношении памятников архитектуры, к которым предъявляются более высокие требования.

Полученные результаты также позволяют по-новому взглянуть на требования нормативов в отношении определения прочностных показателей кладки существующих зданий. Предлагаемые принципы испытания образцов кладки позволяют более точно установить гарантированные показатели свойств конструкций существующих зданий за счет их статистической оценки.

Библиографический список

1. Комов В. М. Теоретические и технологические принципы производства крупноразмерной поризованной керамики: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2004. 48 с.
2. Поляков С. В., Измайлов Ю. В., Коноводченко В. И., Оруджев Ф. М., Поляков Н. Д. Каменная кладка из пильных известняков. Кишинев: Карта молдовеняскэ, 1973. 345 с.
3. Ржаницын А. Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.
4. Райзер В. Д. Теория надежности в строительном проектировании. М.: АСВ, 1998. 304 с.
5. Беленцов Ю. А., Харитонов А. М. Определение коэффициента запаса при оценке качества кирпичных конструкций // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 4 (57). С. 105–110.

References

1. Komov V. M. *Teoreticheskie i tekhnologicheskie printsipy proizvodstva krupnorazmernoy porizovannoy keramiki. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk* [Theoretical and technological principles of production of large-sized porous ceramics. Author's thesis of Dr. Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2004, 48 p.
2. Polyakov S. V., et al. *Kamennaya kladka iz pil'nykh izvestnyakov* [Masonry made of sawn limestone]. Kishinev, Kartya moldovenyaske Publ., 1973, 345 p.
3. Rzhantsyn A. R. *Teoriya rascheta stroitel'nykh konstruktсий na nadezhnost'* [Theory of structural reliability analysis]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1978, 239 p.

4. Rayzer V. D. *Teoriya nadezhnosti v stroitel'nom proektirovanii* [The theory of reliability in construction design]. Moscow, ASV Publ, 1998, 304 p.

5. Belentsov Yu. A., Kharitonov A. M. *Opredelenie koeffitsienta zapasa pri otsenke kachestva kirpichnykh*

konstruktsiy [Assessing the factor of ignorance at the evaluation of the quality of masonry structures]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 4 (57), pp. 105–110.