

УДК 331.45

DOI 10.47367/0021-3497_2023_3_201

**ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ КИРПИЧНЫХ НАРУЖНЫХ СТЕН
ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ****OPERATIONAL SAFETY OF BRICK EXTERIOR WALLS
OF TEXTILE INDUSTRY ENTERPRISES**О.А. КОРОЛЬ¹, Ю.О. КУСТИКОВА¹, А.В. ШЕНБЕРЕВА²O.A. KOROL¹, Y.O. KUSTIKOVA¹, A.V. SHENBEREVA²¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
²Ивановский государственный политехнический университет)¹Moscow State University of Civil Engineering,
²Ivanovo State Polytechnic University)

E-mail: yulia.kustikowa@yandex.ru

В результате визуального и инструментального обследования зданий предприятий текстильной промышленности возможно своевременное выявление видимых и скрытых дефектов наружных стен. Одновременно определяют места расслоения кладки, скрытые дефекты и зоны их распространения. Это позволяет обеспечивать безопасную эксплуатацию таких зданий. С помощью неразрушающих методов контроля качества кирпичной кладки устанавливают фактическую прочность наружных стен. Кроме того, ведется мониторинг изменения физико-механических свойств кирпича и раствора во времени. Наиболее достоверно прочностные характеристики кладки стен целесообразно определять комплексно-механическими и физическими неразрушающими методами испытаний. Результаты такого исследования стен позволяют прогнозировать безопасный срок их эксплуатации. Параллельно с натурными обследованиями конструкций для зданий текстильной промышленности, имеющих длительный срок эксплуатации в специфических условиях производственной внутренней среды и сформированных в ней условиях микроклимата, проводят историко-архитектурные исследования архивных документов и соответствующих нормативных требований в период возведения этих зданий. В целом на протяжении всего периода эксплуатации наружные стены из кирпича сохраняют свои эксплуатационные качества и могут безаварийно продолжать работу в конструктивной системе здания. С течением времени деградационные процессы могут нарастать, поэтому требуется вести мониторинг и оценку технического состояния несущих и ограждающих конструкций.

As a result of visual and instrumental inspection of buildings of textile industry enterprises it is possible to detect visible and latent defects of exterior walls in a timely manner. At the same time the places of masonry delamination, latent defects and zones of their spreading are determined. This makes it possible to ensure the safe operation of such buildings. With the help of non-destructive quality control methods of masonry the actual strength of the outer walls is established. In addition, the changes in the physical and mechanical properties of bricks and mortar over time are monitored. It is most reliable to determine the strength characteristics of masonry walls in a comprehensive way - by mechanical and physical non-destructive testing methods. The results of such examination of the walls make it possible to predict their safe service life. Alongside with on-site inspections of constructions for textile industry buildings which have a long period of exploitation in specific conditions of industrial indoor environment and microclimate conditions formed in it, historical and architectural researches of archive documents and the relevant normative requirements during the period of erection of these buildings are carried out. In general, during the entire period of operation the brick exterior walls retain their performance qualities and can continue to operate without failure in the structural system of the building. Over time, degradation processes can increase, so it is necessary to monitor and evaluate the technical condition of the load-bearing and enclosing structures.

Ключевые слова: кирпичная кладка, здания предприятий, текстильная промышленность, прочностные характеристики, наружные стены.

Keywords: masonry, enterprise buildings, textile industry, strength characteristics, exterior walls.

Введение

Проектирование и строительство предприятий, зданий и сооружений текстильной промышленности имеют многолетнюю историю. Первая половина XIX века характеризуется постепенным переходом от строительства деревянных зданий к возведению производственных корпусов из камня, кирпича и чугуна. Например, первоначально трикотажные производства размещали в небольших приспособленных одно- и двухэтажных зданиях иного функционального назначения. Позднее возводили и многоэтажные здания в 3–5 этажей (рис. 1) с несущими кирпичными стенами с большим запасом прочности, чугунными или кирпичными колоннами с пролетами 5...6,5 м и шагами 3...3,5 м [1].

Поскольку предприятия текстильной промышленности так же, как швейной, кожевенной, меховой и обувной, относятся к предприятиям легкой промышленности, они подчиняются общим правилам строительного проектирования [2]. Эти указа-

ния, действующие на протяжении последних пятидесяти лет, а также предыдущие (СН 122-60) позволяют судить о проектных решениях действующих предприятий в соответствии с годом их постройки и введением в эксплуатацию.



Рис. 1

Основными объемно-планировочными и конструктивными решениями таких зданий предусмотрена каркасная система с

сеткой колон 12×6 м, 18×12 м или 18×6 м в зависимости от основного назначения зданий. Большинство ограждающих конструкций наружных стен, выполненных из кирпича (рис. 2), за годы эксплуатации подвергались не только длительным силовым нагрузкам, но и температурно-влажностным воздействиям, вследствие которых происходило изменение их прочностных и деформативных характеристик и таких важных физико-механических свойств, как теплопроводность, морозостойкость, водопоглощение. При проведении периодических осмотров и инструментальных обследований наружных стен из кирпича установлено, что они сохранили в целом свои эксплуатационные качества и могут безаварийно продолжать работу в конструктивной системе здания. Однако с течением времени деградационные процессы могут нарастать, поэтому требуется проводить мониторинг и оценку технического состояния несущих и ограждающих конструкций.



Рис. 2

Одной из особенностей кирпичных стен является сочетание в кладке двух материалов с различными физико-механическими характеристиками, что при проведении их обследования создает дополнительные сложности, связанные с необходимостью определять прочностные показатели как самого кирпича, так и раствора [3], [4]. Методологические основы исследований работы каменной кладки под нагрузкой, разработанные ведущими учеными и специалистами в данной области [5], использованы для подготовки нормативных документов и методических пособий.

Большинство исследований [5], [6] и требования норм (табл. 2 СП 15.13330.2012) свидетельствуют, что в прочности на сжатие кладки прочность камня более значима, чем прочность растворного шва. Однако изменение свойств растворного шва влияет на прочность кладки в целом и подлежит определению в том же порядке, как и самого кирпича.

В ряде исследований всесторонне изучена работа кладок из различных видов кирпичей в целом и не верифицирована работа камня и раствора по отдельности [7]. Практически все исследования выполняются в лабораторных условиях на изготовленных фрагментах кладки, что зачастую не позволяет идентифицировать их с натурными условиями и проследить изменения свойств во времени.

Методы исследования

Согласно действующим в России нормативным документам прочность керамического кирпича на сжатие может быть определена только испытанием образцов, отобранных непосредственно из тела кладки. Испытания выполняются по требованиям ГОСТ Р 58527-2019 «Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе». Стандарты, регламентирующие применение методов неразрушающего контроля (НК) для кирпича, в нашей стране ограничены действующим ГОСТ 24332-88 «Кирпич и камни силикатные. Ультразвуковой метод определения прочности при сжатии», который описывает требования к выполнению ультразвукового контроля прочности только для силикатного кирпича.

Особенностью предприятий текстильной промышленности является наличие производственных цехов с различной степенью агрессивности среды – неагрессивной, слабой, средней и сильно агрессивной. Согласно требованиям [2] в качестве ограждающих конструкций производств с агрессивными средами может быть применен только кирпич глиняный обыкновенный со следующими характеристиками:

- марка по прочности на сжатие должна быть не менее 100;
- водопоглощение – не более 10%;

- марка по морозостойкости кирпича для внешней части кладки наружных стен (на глубину 12 см) в зданиях:
 - с влажным режимом – не менее Mrз 35;
 - с мокрым режимом – не менее Mrз 50;
- марка по морозостойкости кирпича для внутренней части кладки – не менее Mrз 25.

Применение глиняного кирпича полусухого прессования, а также силикатного кирпича не допускается. Растворы для кладки должны назначаться стойкими к агрессивной среде.

В помещениях с агрессивными средами и высокой влажностью воздуха внутренние поверхности наружных кирпичных стен и перегородки подлежат оштукатуриванию с последующей облицовкой или окраской. Облицовка или оштукатуривание внешних поверхностей наружных кирпичных стен таких помещений не допускается. Для повышения долговечности кирпичных стен их наружную поверхность рекомендуется покрывать гидрофобизирующими составами.

Другой особенностью эксплуатируемых производственных зданий предприятий текстильной промышленности является повышенная температура внутреннего воздуха с диапазоном от 20 до 27 °С и относительная влажность воздуха – 75-40%. В совокупности эти факторы влияют на изменение физико-механических характеристик кирпичных стен, условия эксплуатации которых отличаются от жилых и общественных зданий.

Для эксплуатируемых зданий различного назначения исследована возможность применения для контроля прочности кирпичной кладки методов неразрушающего контроля, широко используемых для бетона, – метод пластической деформации, ультразвуковой метод, метод ударного импульса и др. [8...11].

Импульсный акустический метод, получивший наиболее широкое распространение, основан на использовании закономерности распространения упругих волн в материале. С применением электронной аппаратуры могут быть получены такие акустические характеристики материала, как скорость переднего фронта продоль-

ных C_1 , поперечных C_2 и поверхностных C_3 волн; основная частота f свободных колебаний системы частиц среды; характеристики затухания амплитуды колебаний.

Зная плотность среды ρ и акустические характеристики, можно найти ряд физических параметров для трехмерной среды, описывающих упругие и вязкие свойства материала:

- коэффициент Пуассона μ , определяемый по соотношению скоростей продольных и поперечных волн:

$$\mu = 0,5 - \frac{C_2^2}{2(C_1^2 - C_2^2)};$$

- динамический модуль упругости E_d

$$E_d = k\rho C_1^2,$$

где $k = (1 + \mu)(1 - 2\mu/1 - \mu)$; акустическое сопротивление среды ρC ; акустическая жесткость среды $\rho C f$.

Скорости распространения переднего фронта продольных, поперечных и поверхностных волн в образцах и конструкциях определяют акустическим микросекундомером, с помощью которого может быть осуществлено сквозное и поверхностное прозвучивание конструкций. При поверхностном прозвучивании определяется время прихода переднего фронта продольных, поперечных и поверхностных волн. В этом случае при одной и той же базе измерения могут быть определены значения скоростей всех типов волн.

С помощью импульсного акустического метода может быть выявлена дефектность каменных конструкций. Для определения глубины распространения трещины, выходящей на поверхность конструкции, используется способ построения годографа. По локальному увеличению времени (разрыв годографа) прохождения акустического импульса в зависимости от базы измерения при фиксированном положении датчика вычисляют глубину трещины. Невидимые дефекты конструкций (пустоты, инородные включения и т. д.) и зону их распространения выявляют методом последовательного приближения при сквозном прозвучивании конструкций.

С помощью импульсного акустического метода может быть также установлена прочность материала по корреляции между прочностью и его физическими характеристиками – скоростью распространения упругих волн, акустическим сопротивлением или акустической жесткостью среды. Проведенными исследованиями установлена возможность использования этого метода для определения несущей способности кирпичных стен.

Как установлено ранее проведенными исследованиями, при испытаниях кирпича для корректной регистрации скорости продольных волн в массиве необходимо иметь длину волны не более 3,6 см, что при скорости 1800...2200 м/с соответствует частоте излучателей 60 кГц [3]. Протяженность ближней зоны в этом случае будет равна 6 см при обычных излучателях.

Таким образом, на кирпиче стандартных размеров при использовании серийной аппаратуры, в комплект которой входят излучатели частотой 60 кГц, можно определять скорость продольных волн в массиве, а с применением поверхностного метода прозвучивания и способа построения линейного годографа – скорости поперечных и поверхностных волн.

При известной плотности кирпича можно определить: динамический модуль упругости E_d и динамический коэффициент Пуассона μ . Установлены пропорциональные соотношения между начальным модулем упругости и временным сопротивлением кладки (СП 15.13330.2020). В то же время начальный модуль упругости соответствует значению динамического модуля упругости, измеряемого при импульсных акустических испытаниях:

$$E_d = \nu E_0 = \nu \alpha R,$$

где ν – коэффициент пропорциональности; E_0 – начальный модуль упругости кладки; α – упругая характеристика кладки как функция прочности раствора; R – прочность кладки.

Таким образом, для определения прочности кладки в эксплуатируемом здании достаточно установить динамический мо-

дуль упругости кладки и прочность раствора.

Однако необходимо учитывать, что с точки зрения механики кирпичная кладка представляет собой слоистую конструкцию, состоящую из слоев кирпича и раствора, а с точки зрения закономерности прохождения акустического импульса слоистость конструкции будет очевидна только при условии неравенства акустических сопротивлений кирпича и раствора [12], т.е. при

$$\rho_k C_k \neq \rho_p C_p,$$

где ρ_k и ρ_p – плотность соответственно кирпича и раствора; C_k и C_p – скорости распространения колебаний соответственно в кирпиче и растворе.

Теоретически возможны три варианта, вытекающие из приведенного условия:

$$\left. \begin{array}{l} \text{I вариант } \rho_k C_k \approx \rho_p C_p \\ \text{II вариант } \rho_k C_k \gg \rho_p C_p \\ \text{III вариант } C_k \ll \rho_p C_p \end{array} \right\} \quad (1)$$

Первый вариант характерен для кладок на известковых растворах и их разновидностях при низких марках кирпича. При этом для условий распространения колебаний кладка представляет собой акустически монолитную среду, и определить динамический модуль упругости можно так же, как для монолита, по выражению

$$E_d = k \rho_k C_k^2. \quad (2)$$

Для двух других вариантов динамический модуль упругости кладки может быть определен применительно к слоистой среде в соответствии с выражением:

$$E_d = E_{dk} E_{dp} / (E_{dk} S_p + E_{dp} S_k), \quad (3)$$

где E_{dk} и E_{dp} – динамический модуль упругости соответственно кирпича и раствора; S_k и S_p – приведенные толщины соответственно кирпича и раствора:

$$S_k = h_k / (h_k + h_p); \quad S_p = h_p / (h_k + h_p),$$

h_k и h_p – соответственно толщина кирпича и раствора в шве кладки.

Исходя из этого прочность кладки может быть определена по одному из следующих выражений:

$$R = \frac{100+R_k}{3(100+1,25R_k)} R_k \left(1 - \frac{0,2}{0,3+\frac{R_k}{2R_p}} \right); \quad (4)$$

$$R = \frac{H_k}{v\alpha} = \frac{k\rho_k C_k^2}{v\alpha}; \quad (5)$$

$$R = \frac{H_k H_p}{v\alpha(H_k S_p + H_p S_k)} = \frac{k_k k_p \rho_k \rho_p C_k^2 C_p^2}{v\alpha(k_k \rho_k C_k^2 S_p + k_p \rho_p C_p^2 S_k)}. \quad (6)$$

Как видно из структуры выражений (4) – (6), чтобы найти прочность кладки R , необходимо знать марку кирпича и раствора или динамический модуль упругости кладки и марку раствора. Определение этих величин при использовании импульсного акустического метода основано на построении тарировочных зависимостей отдельно для кирпича и раствора с учетом условий распространения и особенностей регистрации акустических импульсов.

Исходя из того, что акустическое сопротивление кирпича и раствора может быть различным, определены граничные условия для выражений (5) и (6). При известных прочностях кирпича и раствора, а также значениях их среднеквадратических отклонений выражения (5) и (6) ограничены соответственно условиями:

$$\rho_k C_k \pm \sigma_k \approx \rho_p C_p \pm \sigma_p,$$

$$\rho_k C_k \pm \sigma_k \neq \rho_p C_p \pm \sigma_p.$$

При неравенстве волновых сопротивлений кирпича и раствора исследователями предлагается прочность кирпича измерять по тарировочной кривой $R_k - \rho_k C_k$ импульсным акустическим методом, а прочность раствора (с учетом ширины шва) – по тарировочным кривым склерометрическим способом [3].

Обобщение ряда исследований показало, что в старой кладке на известковом растворе и кладках из современного кирпича на растворах низких марок при $C_k > C_p$ скорость распространения колебаний стабилизируется: у старых кладок с базы измерения в 3...4 ряда, у современных в 5...7

рядов кладки, чем обоснованы рекомендации принимать базу измерения при испытании старых кладок размером 25...50 см, а новых 40...60 см.

При обследовании кирпичных стен для определения фактического значения кладки используется выражение

$$R_p = RmK, \quad (7)$$

где m – коэффициент условий работы; K – коэффициент однородности.

По обобщенным данным обследований различных авторов большого количества зданий установлено, что коэффициент однородности кирпичных стен по прочности для кирпичных зданий старой постройки колеблется в пределах $0,46 < K < 0,78$, в то время как для новых составляет $0,38 < K < 0,54$ [3].

Изменение других важных физико-механических характеристик – плотности и влажности кладки – определяют плотномером и влагомером, устанавливаемым в соответствии со схемой испытаний.

Кроме того, для оценки однородности и сплошности материала стен в отдельных местах (простенках, перемычках, пилястрах и др.) производят сквозное прозвучивание. При обнаружении в стене трещины определяют глубину, ширину ее раскрытия, расположение и конфигурацию. Ширину раскрытия и глубину проникания трещины устанавливают способом последовательного приближения. Зону ее распространения определяют, попеременно переставляя датчики по вертикали и горизонтали. Прочность кладки в местах замеров оценивают по соответствующим тарировочным кривым. В отдельных местах для контроля точности информации о прочностных характеристиках материалов, получаемой при использовании физических методов испытаний, производят испытания склерометрическим способом.

Результаты и обсуждения

Определение прочности кирпичной кладки неразрушающими методами имеет ряд преимуществ. При исследовании не происходит ослабления конструкций в результате отбора образцов и не нарушается

их внешний вид. Неразрушающие методы наименее трудоемки и затратны в сравнении со стандартными испытаниями. Однако результаты испытаний неразрушающим методом контроля позволяют лишь приблизительно оценить прочность кирпича и во многих случаях характеризуются большой погрешностью [13]. Это вызвано, в частности, тем, что прочностные характеристики определяются по исследованию поверхностного слоя, подверженного размораживанию, эрозии и увлажнению. Все эти факторы напрямую влияют на результаты исследований. Учесть вышеуказанные факторы при определении прочности кирпича неразрушающим методом попытались авторы работы [9]. Но при этом исследовался тот же поверхностный слой, игнорировались возможные дефекты в теле камня и его неоднородность, которая характерна особенно для старого кирпича производства XIX века и ранее.

Вместе с тем, по мнению некоторых авторов, использование известных методов НК для определения прочности керамического кирпича при обследовании конструкций недопустимо, потому что в первую очередь отсутствуют стандарты, регламентирующие применение данных методов, а главное – из-за того, что керамический кирпич имеет существенно большую неоднородность строения и анизотропность физико-механических свойств, чем бетон. Известно, что применение косвенных методов неразрушающего контроля даже для определения прочности бетона весьма условно. Для корректной реализации этих методов необходимо руководствоваться накопленными статистическими данными и учитывать в расчетах соответствующие значения коэффициентов однородности материалов и условия работы конструкций.

ВЫВОДЫ

Здания предприятий текстильной промышленности, имеющие более чем вековую историю, не только представляют интерес с архитектурной и градостроительной точки зрения, но и являются уникаль-

ным экспериментальными объектами для оценки безопасной эксплуатации зданий с применением различных строительных материалов. Особый интерес представляют исследования наружных стен из кирпича, так как этот традиционный отечественный материал применяется на протяжении многих лет, зарекомендовал себя как конкурентоспособный по экологическим требованиям в жизненном цикле зданий и имеет перспективы использования в современном строительстве.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Конюков А.Г., Москаева А.С.* Развитие архитектурной типологии производственных зданий (на примерах трикотажных фабрик). Н. Новгород: ННГАСУ, 2014.
2. Руководство по проектированию антикоррозионной защиты строительных конструкций производственных зданий предприятий текстильной промышленности. М.: НИИЛШ Госстроя СССР, 1980.
3. *Комисарчик Р.Г.* Методы технического обследования ремонтируемых зданий. М.: Стройиздат, 1975.
4. Рекомендации по обследованию и оценке технического состояния крупнопанельных и каменных зданий. М.: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, 1988.
5. *Онищик Л.И.* Прочность и устойчивость каменных конструкций. М.-Л.: Главредстройлит, 1937.
6. *Гроздов В.Т.* Техническое обследование строительных конструкций зданий и сооружений. СПб.: Издательский Дом KN+, 2001.
7. *Гнедина Л.Ю.* Экспериментальное определение прочностных характеристик различных видов кирпича и кирпичной кладки при центральном сжатии // Строительные материалы. 2007. №12. С. 18...19.
8. *Житушкин В.Г., Кучеров В.Н.* Определение прочности кладки из кирпича в натуральных условиях // Жилищное строительство. 2001. №9. С. 11...12.
9. *Гучкин И.С., Артюшин Д.В.* Определение прочности (марки) керамического кирпича в конструкциях неразрушающим методом // Изв. вузов. Строительство. 2006. №1. С. 103...104.
10. Руководство по определению прочности кирпичной кладки неразрушающим методом пластических деформаций. Краснодар: КубГУ, 1999. 15 с.
11. *Brozovsky J., Zach J.* Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures // IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires. 2007 [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf>

12. *Бреховских Л.М.* Волны в слоистых средах. М.: Изд-во АН СССР, 1957.

13. *Деркач В.Н., Жерносек Н.М.* Методы оценки прочности каменной кладки в отечественной и зарубежной практике обследования зданий и сооружений // Вестник Белорусско-Российского университета. 2010. № 3(28). С. 135...143.

REFERENCES

1. *Konyukov A.G., Moskaeva A.S.* Development of the architectural typology of industrial buildings (using examples of knitting factories). N. Novgorod: NNGASU, 2014. 105 c.

2. Guidelines for the design of corrosion protection of building structures of industrial buildings of the textile industry enterprises. Moscow, NIILShGosstroy of the USSR, 1980, p. 89.

3. *Komisarchik R.G.* Methods of Technical Investigation of Buildings under Repairs. Moscow: Stroizdat, 1975. 88 c.

4. Recommendations on the Inspection and Assessment of the Technical Condition of Large-Panel and Masonry Buildings. Moscow: Central Research Institute of Building Research named after V.A. Kucherenko, 1988. 36 c.

5. *Onishchik L.I.* Strength and Stability of Stone Structures. M.-L.: Glavredstroilit, 1937. 292 c.

6. *Grozdov V.T.* Technical Inspection of Building Structures of Buildings and Structures. SPb: KN+ Publishing House, 2001. 140 c.

7. *Gnedina L.* Experimental Determination of Strength Characteristics of Various Bricks and Brick-

work in Central Compression // Stroitelnie Material. 2007. №12. С. 18-19.

8. *Zhitushkin V.G., Kucherov V.N.* Determination of Strength of Brickwork in Natural Conditions // Housing Construction. 2001. №9. С. 11-12.

9. *Guchkin I.S., Artyushin D.V.* Determination of Strength (Grade) of Ceramic Brick in Structures by Non-Destructive Method // Izvestia Vysshee Uchebovania. Construction. 2006. №1. С. 103-104.

10. Guidelines for Determining the Strength of Brickwork by Non-Destructive Method of Plastic Deformation / Kub State University. Krasnodar, 1999. 15 c.

11. *Brozovsky J., Zach J.* Non-destructive Testing of Solid Brick Compression Strength in Structures // IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires. 2007 [Electronic resource]. System requirements: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/1.pdf>.

12. *Brekhovskikh L.M.* Waves in Layered Media. Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1957.

13. *Derkach V.N., Zhernosek N.M.* Estimation methods of strength of masonry in domestic and foreign practice of inspection of buildings and structures // Bulletin of Belarusian-Russian University. 2010. № 3(28). С. 135-143.

Рекомендована кафедрой жилищно-коммунального комплекса Национального исследовательского Московского государственного строительного университета. Поступила 16.03.23.