

ВІДНОВЛЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ ПРИДАТНОСТІ КАМ'ЯНОЇ КЛАДКИ, ПОШКОДЖЕНОЇ В УМОВАХ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ

RESTORING THE SERVICEABILITY OF MASONRY DAMAGED IN EMERGENCY SITUATIONS

Соловйов В. В., доктор хімічних наук, професор, **Довженко О. О.**,
кандидат технічних наук, професор, **Погрібний В. В.**, кандидат технічних
наук, старший науковий співробітник, **Усенко Д. В.**, аспірант

*Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія
Кондратюка», Україна*

Solovyov V. V., DSc, Professor, **Dovzhenko O. O.**, PhD, professor,
Pohribnyi V. V., PhD, senior researcher, **Usenko D. V.**, PhD candidate

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Ukraine

Анотація. В умовах надзвичайних ситуацій підвищується ризик часткового або повного руйнування будівель і споруд, що обумовлює необхідність прийняття заходів щодо своєчасного уникнення негативних наслідків та підвищення екологічної безпеки. Розглядаються можливі варіанти підсилення кам'яної кладки при сумісній дії вертикальних і горизонтальних навантажень: діагональними металевими тяжами, розчинними та бетонними аплікаціями, перехресними та горизонтальними залізобетонними смугами, сіткою із скловолокна, вуглеволокном. Проаналізовано характер руйнування дослідних зразків та визначальні фактори впливу. У якості методики розрахунку міцності підсилених елементів запропоновано варіаційний метод у теорії пластичності, запропонований в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Розроблено кінематично можливу схему, котра базується на характері руйнування, отриманому в дослідях. Отримана формулу для визначення граничного навантаження. Враховано обидві характеристики міцності кладки: при стисковій й розтязі, відношення геометричних параметрів елемента та площадки навантаження, кількість, місце розташування та міцність елементів підсилення. Розглянуто приклади розв'язання задач міцності при різних варіантах підсилення вуглеволокном.

Abstract. In emergency situations, the risk of partial or complete destruction of buildings and structures increases, which necessitates taking

measures to timely avoid negative consequences and improve environmental safety. Possible options for strengthening masonry under the combined action of vertical and horizontal loads are considered: diagonal metal strands, soluble and concrete applications, cross and horizontal reinforced concrete strips, fiberglass mesh, and carbon fiber. The nature of the destruction of prototypes and the determining factors of influence are analyzed. As a method for calculating the strength of reinforced elements, a variational method is proposed in the theory of plasticity, proposed at the National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic». A kinematically possible scheme has been developed based on the nature of the fracture obtained in the experiments. A formula for determining the boundary load is obtained. Both strength characteristics of masonry are taken into account: in compression and tension, the ratio of the geometric parameters of the element and the load area, and the number, location, and strength of reinforcement elements. Examples of solving strength problems for different variants of carbon fiber reinforcement are considered.

В Україні експлуатується велика кількість будівель із несучими цегляними стінами. В умовах надзвичайних ситуацій підвищується ризик часткового або повного руйнування будівель і споруд, що обумовлює необхідність прийняття заходів щодо своєчасного уникнення негативних наслідків та підвищення екологічної безпеки. На кам'яні елементи діють горизонтальні сили, наявність яких може призвести до руйнування кладки шляхом діагонального зсуву (рис. 1). Вибір способу підсилення пошкоджених будівель є актуальним завданням і потребує розроблення методики розрахунку опору кам'яної кладки сумісній дії вертикального і горизонтального навантаження, котра відсутня в нормативних документах.



Рис.1. Характер руйнування цегляної кладки при сумісній дії вертикальних і горизонтальних навантажень шляхом діагонального зсуву

В експериментальних дослідженнях [1-5] проаналізовано характер руйнування, визначальні фактори впливу: матеріал кладки, міцність каменю

і розчину, внутрішнє й зовнішнє армування кладки, підсилення діагональними металевими тяжами, розчинними та бетонними аплікаціями, перехресними та горизонтальними залізобетонними смугами, вуглеволокном та інші.

Традиційне застосування у якості підсилення металевих діагональних тяжів або попереднього обтиснення безумовно підвищує опір кладки.

Відоме підсилення кладки шляхом нанесення на бічні поверхні штукатурного шару з високоміцного розчину без та з армуванням його металевими сітками. Наявність штукатурних шарів, котрі працюють спільно з кладкою, підвищує міцність кладки, а наявність сіток дозволяє істотно підвищити її тріщиностійкість (до 40%) і відповідно відтермінувати момент руйнування, створюючи тим самим сприятливі умови для розвитку пластичних деформацій; руйнування підсиленої кладки відбувається за діагональною тріщиною, при наявності сіток в шарі підсилення уздовж стиснутої діагоналі паралельно раніше утвореним можуть з'явитися нові тріщини [6].

Експерименти [7] включали дослідження елементів із зовнішнім підсиленням зварними сітками із дроту, розміщеними в шарі бетону. Поведінка підсилених зразків під навантаженням залежала від інтенсивності та способу армування. Руйнування починалося із утворення діагональної тріщини, розвиток якої певний час стримувала арматура, котра сприяє більш пластичному характеру руйнуванню порівняно із зразками без підсилення. Для зразків, армованих в двох напрямках, руйнування відбувалося за тріщиною, котра розповсюджувалася за довжиною діагоналі зразків, в напрямку якої прикладена сила. На останньому етапі завантаження спостерігалось місцеве роздроблення кладки біля вантажних башмаків.

У дослідах [8] розглядалось підсилення армованими перехресними та горизонтальною розчинними смугами. Підсилені зразки зруйнувалися за діагональними тріщинами. За умови досягнення максимальної несучої здатності, стрічки зберігали свою цілісність і попереджували обрушення дослідних зразків при руйнуванні. Навантаження тріщиноутворення для підсилених елементів зросло на 20-40%, а руйнівне навантаження на 40-65% порівняно із елементами без підсилення. Збільшення інтенсивності армування смуг, рівня вертикальних напружень та міцності розчину підвищувало опір зсуву, а зростання відношення товщини до ширини елемента навпаки зменшувало його. Підсилення підвищило пластичні властивості кладки в 1,6 разів при односторонньому, і в 2,8 разів при двосторонньому підсиленні.

В експериментах [9] було використано підсилення зразків сіткою із скловолокна з обох сторін стіни з наступним нанесенням шару розчину.

Мало місце діагональне руйнування (рис. 2), їх міцність підвищувалася в середньому 1,3 разів, при цьому збільшилися пластичність кладки.

У дослідженнях [10-12] у якості елемента підсилення використовувалося вуглеволокно FibARM Tape 230 і FibARM Tape 240 та в'язуче FibArm Resin 230+ і FibArm Resin 530+. Застосування системи зовнішнього армування дозволило підвищити несучу здатність кам'яної кладки на 30 – 100% залежно від міцності вуглеволокна, площі, товщини і кількості шарів підсилення. Руйнування цих зразків, на відміну від підсилених за допомогою залізобетонних і бетонних аплікацій, які наносилися за звичайною технологією і методом торкрет бетону, відбувалося за діагональною тріщиною зовні крихко, практично миттєво після досягнення напруженнями граничних значень.



Рис.2. Характер руйнування дослідних зразків, підсилених шаром розчину, армованого сіткою із скловолокна [9]

У [13] надані результати випробування зразків, підсилених полотном з вуглеволокна марки MBRACE FIB CF230 / 4900.200g / 5.100m з одного та двох боків зразка уздовж його розтягнутої діагоналі. Несуча здатність у першому випадку зовнішнього підсилення підвищується приблизно в 1,5 рази, а у другому в два рази. Руйнування зразків відбувалося уздовж його діагоналі як за каменем так і за розчином зовні крихко.

При порівнянні властивостей металевих та, наприклад, вуглецевих композитних елементів підсилення (рис. 3, а) останні мають суттєві переваги: значно менше співвідношення власної ваги до міцності, майже повна корозійна стійкість, відсутність обмежень за довжиною, спрощений, більш дешевий та швидкий монтаж, більша втомна міцність [14]. Недоліками можна вважати необхідність термічного захисту та більшу вартість матеріалу. На рис. 3, б наведені діаграми [15], котрі ілюструють у першу чергу міцнісні переваги композитних матеріалів перед сталевими.

Крім того вуглецеві композити мають більшу жорсткість. На рис. 3, в наведена схема розташування вуглецевих стрічок.

У Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» розроблено варіаційний метод у теорії пластичності, котрий вдало використовується при розрахунках бетонних, залізобетонних, кам'яних та армокам'яних елементів при зрізі, місцевому стисненні.

Розв'язання задачі починається із створення кінематичної схеми руйнування (рис. 4, а). Вона базується на картині руйнування (рис. 2). Розглядається підсилення у трьох рівнях за висотою зразка (рис. 4, б).

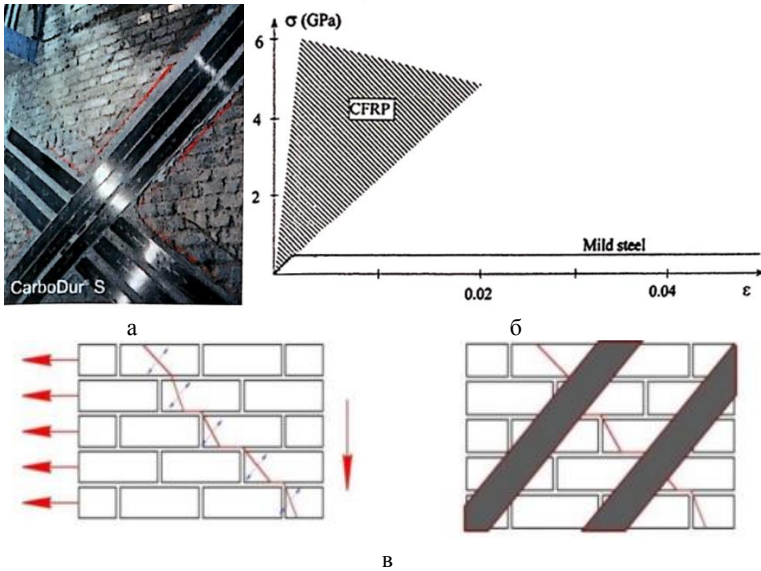


Рис.3. Підсилення цегляної кладки стрічками із вуглеволокна (а) та діаграми «напруження-деформації» при одновісному розтягті для сталі (б) та вуглецевих волокон (в), схеми наклеювання стрічок при діагональних тріщинах (в)

Елемент, що розглядається, розділяється на жорсткі диски, котрі здійснюють поступальний рух: клини під площадкою навантаження рухаються назустріч один одному із швидкістю V_2 , а частини, окреслені ділянками АСС₁А і ВСС₁В₁ віддаляються один від одного зі швидкістю V_1 . Поверхня руйнування складається із чотирьох площадок зсуву (грані клину), на яких діють граничні нормальні та дотичні напруження, котрі визначаються за умовою міцності Баландіна-Генієва, на площадці відриву прийнятні напруження осевого розтягу кладки при руйнуванні за каменем.

Наступним етапом є визначення стрибків швидкостей на ділянках руйнування:

- на гранях клину (AC і BC) вони однакові і виражаються через невідомий кут γ

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_n &= V_1 \cos \gamma - V_2 \sin \gamma \\ \Delta V_t &= V_1 \sin \gamma + V_2 \cos \gamma \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

площа ділянок

$$S_{AC} = S_{BC} = \frac{l_{loc}}{2 \sin \gamma} b, \quad (2)$$

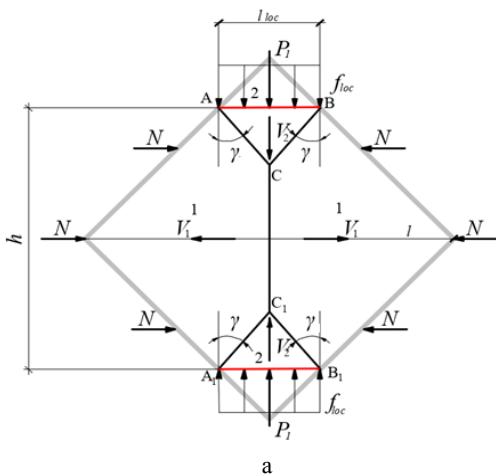


Рис. 4. Кінематична схема руйнування (а) підсиленого в трьох рівнях зразка (б)

для ділянки CC_1 розриви швидкостей обчислюється як

$$\left. \begin{aligned} \Delta V_n &= 2V_1 \\ \Delta V_t &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (3)$$

а площа поверхні ділянки CC_1 дорівнює

$$S_{CC_1} = \left(h - \frac{l_{loc}}{2 \operatorname{tg} \gamma} \right) b. \quad (4)$$

Після цього етапу визначається потужність пластичної деформації цегляної кладки на площадках AC та BC як складова загального функціонала

$$\int_{S_i} m \left[2B \sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta V_t}{\Delta V_n} \right)^2} - 1 \right] \Delta V_n ds, \quad (5)$$

де $B^2 = (1 + \chi / (1 - \chi)^2) / 3$; $\chi = \frac{f_t}{f_d}$; S_i – площа поверхні руйнування; $\Delta V_t, \Delta V_n$ стрибки дотичної та нормальної до S_i складових швидкості.

$$m \left[2B \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{V_1 \sin \gamma + V_2 \cos \gamma}{V_1 \cos \gamma - V_2 \sin \gamma} \right)^2} - 1 \right] (V_1 \cos \gamma - V_2 \sin \gamma) \frac{l_{loc} b}{\sin \gamma}. \quad (6)$$

Далі записується потужність зовнішніх сил на заданих швидкостях на площадках CC_1 (площадка з напруженнями f_t), АВ (площадка із зовнішнім навантаженням)

$$2f_t V_1 \left(\frac{h}{2} - \frac{l_{loc}}{2tg\gamma} \right) b - f_{loc} l_{loc} b V_2. \quad (7)$$

Наступним етапом являються математичні перетворення функціоналу методу та дослідження його на стаціонарний стан

$$J = m \left[2B \sqrt{1 + 0,25 \left(\frac{V_1 \sin \gamma + V_2 \cos \gamma}{V_1 \cos \gamma - V_2 \sin \gamma} \right)^2} - 1 \right] (V_1 \cos \gamma - V_2 \sin \gamma) \frac{l_{loc} b}{\sin \gamma} + 2f_t V_1 \left(\frac{h}{2} - \frac{l_{loc}}{2tg\gamma} \right) b - f_{loc} l_{loc} b V_2 = 0. \quad (8)$$

Враховуючи, що $k = V_1 / V_2$ і $\alpha = h / l_{loc}$, отримано формулу для визначення граничного навантаження для цегляного елемента

$$\frac{P_{lu}}{mbl_{loc}} = \left[2B \sqrt{(k - tg\gamma)^2 + 0,25(ktg\gamma + 1)^2} - (k - tg\gamma) \right] / tg\gamma + \frac{f_t k (\alpha tg\gamma - 1)}{tg\gamma m}. \quad (9)$$

Результати розрахунку для квадратного зразка із симетричним навантаженням при $\chi = 0,104$: $k = 0,922$, $\gamma = 29,78^\circ$, $P_{lu} / mbl_{loc} = 1,464$.

Рис. 5 ілюструє геометрію поверхні руйнування для даного випадку.

Підсилення розглядаються як зовнішнє армування, в функціонал методу вводиться додатковий член, котрий враховує потужність деформування вуглеволокна на заданих швидкостях

$$(2A_1 + A_2) \sigma_y 2V_1, \quad (10)$$

тут A_1 та A_2 – площі стрічок підсилення, σ_y – напруження в стрічках на момент руйнування.

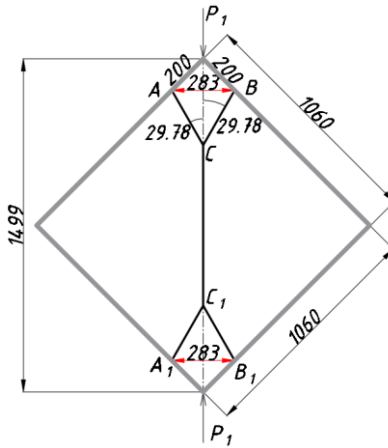


Рис.5. Геометрія поверхні руйнування квадратного кам'яного елемента при діагональному зсуві

Граничне навантаження для підсиленого зразка підраховується за формулою

$$\frac{P_{lu}}{mbl_{loc}} = \frac{\left[2B\sqrt{(k - tg\gamma)^2 + 0,25(1 + ktg\gamma)^2} - (k - tg\gamma) \right]}{tg\gamma} + \frac{f_1 k (ctg\gamma - 1)}{mtg\gamma} + \frac{(2A_1 + A_2)\sigma_y k}{bl_{loc} m} \quad (11)$$

Для підсилення використовують декілька різновидів стрічок, які розрізняються за розмірами перерізу та модулем пружності (табл. 1) [15].

На рис. 6 зображено зміну геометрії руйнівної поверхні залежно від підсилення.

Згідно виконаних розрахунків міцність кам'яних елементів за рахунок підсилення підвищується в межах 1,6-2,7 разів. Однак, в експериментах [2-4] спостерігається збільшення міцності максимально до двох разів при значно більших площах елементів підсилення. Це пояснюється тим, що напруження вуглеволокна при розриві досягає 2800 МПа, що перевищує відповідні параметри для високоміцної арматури. Міцнісні характеристики кладки значно нижчі, отже при руйнуванні підсиленого зразка, напруження в елементах підсилення не досягають свого максимального значення.

Таблиця 1. Параметри стрічок Sika

Sika CarboDur S (Модуль пружності $E > 165000$ МПа)			
Тип	Ширина, мм	Товщина, мм	Площа перерізу, мм ²
Sika CarboDur S512	50	1,2	60
Sika CarboDur S612	60	1,2	72
Sika CarboDur S812	80	1,2	96
Sika CarboDur S1012	100	1,2	120
Sika CarboDur S1212	120	1,2	144
Sika CarboDur S1512	150	1,2	180
Sika CarboDur S614	60	1,4	84
Sika CarboDur S914	90	1,4	126
Sika CarboDur S1214	120	1,4	168

Результати розрахунку міцності підсиленого зразка за формулою (11) представлено в табл. 2 ($\sigma_y=2800$ МПа для елементів підсилення Sika CarboDur).

Таблиця 2. Результати розрахунків міцності підсилених елементів

Варіант підсилення	χ	k	γ	P_{lu} / mbl_{loc}
стрічка Sika CarboDur S1512	0,104	0,3	16,7	3,98
2 стрічки Sika CarboDur S612		0,379	20,73	3,12
стрічка Sika CarboDur S612		0,5	26,9	2,3

Серед можливих варіантів відновлення кам'яної кладки, пошкодженої в умовах надзвичайної ситуації при сумісній дії вертикальних і горизонтальних навантажень, ефективним являється підсилення за допомогою стрічок із вуглеволокна завдяки їх позитивним властивостям, зокрема невеликій власній вазі, корозійній стійкості, відсутності обмежень за довжиною, простоті і швидкості влаштування.

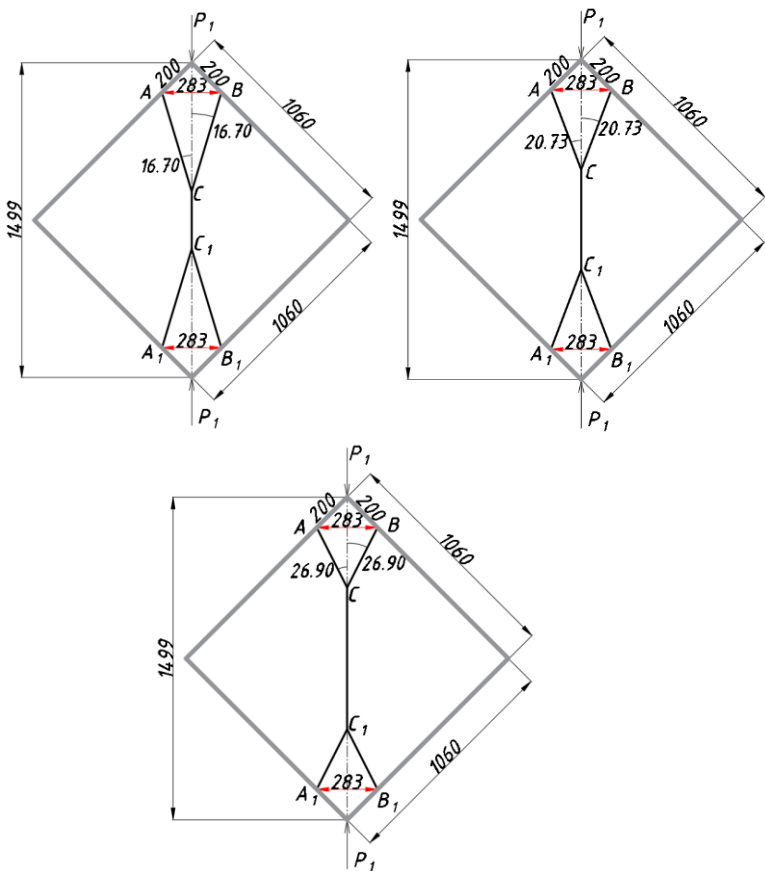


Рис.6. Зміна геометрії руйнівної поверхні в залежності від варіанта підсилення (згідно табл. 2)

Запропонована методика розрахунку міцності підсиленого елемента на основі варіаційного методу у теорії пластичності враховує характер руйнування, міцнісні характеристики кладки стиску та розтягу, відношення розмірів елемента та площадки передачі навантаження, кількість, параметри елементів підсилення. Розглядаються можливі варіанти підсилення кам'яної кладки при сумісній дії вертикальних і горизонтальних навантажень: діагональними металевими тяжами, розчинними та бетонними аплікаціями, перехресними та горизонтальними залізобетонними смугами, сіткою із скловолокна, вуглеволокном. Проаналізовано характер руйнування дослідних зразків та визначальні фактори впливу. У якості методики

розрахунку міцності підсилених елементів запропоновано варіаційний метод у теорії пластичності, запропонований в Національному університеті «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». Розроблено кінематично можливу схему, котра базується на характері руйнування, отриманому в дослідях. Отримана формула для визначення граничного навантаження. Враховано обидві характеристики міцності кладки: при стисковій і розтяжній, відношення геометричних параметрів елемента та площадки навантаження, кількість, місце розташування та міцність елементів підсилення. Розглянуто приклади розв'язання задач міцності при різних варіантах підсилення вуглеволокном.

Використані інформаційні джерела:

1. Туманов А. В. Прочность армированных стен из кирпичной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01. Пенза : ПГАСУ, 2002. 190 с.
2. Поляков С. В. Каменная кладка в каркасных зданиях. М. : Государственное издательство по строительству и архитектуре, 1956. 192 с.
3. Измайлов Ю. В., Буровенко В. А., Кирпий А. Ф. Усиление зданий, поврежденных землетрясением ; под ред. А. В. Друмя, Н. В. Шебалина, Н. Н. Складнева, С. С. Графова, В. И. Ойзермана // Карпатское землетрясение 1986 г. Кишинев : 1990. С 303–317.
4. Kadam S., Singh Y., Bing L. (2012). Mechanical Prop-erties of Externally Strengthened Masonry. Proceedings of 15th world conferences on earthquake.
5. Mustafaraj E., Yardim Y. (2018). In-plane Shear Strengthening of Unreinforced Masonry Walls Using GFRP Jacketing. Periodica Polytechnica Civil Engineering, 62(2), 330–336 <https://doi.org/10.3311/PPci.11311>
6. ДСТУ Б В.2.7–239:2010 Будівельні матеріали. Розчини будівельні. Методи випробувань / Мінрегіонбуд України. К., 2010. 94 с.
7. Тонких Г. П., Кабанцев О. В., Кошаев В. В. Экспериментальные исследования несущей способности каменной кладки при главных нагрузках // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2007. №6. С. 26–31.
8. Физдель А. И. Дефекты в конструкциях и сооружениях и методы их устранения. М. : Стройиздат, 1978. 160 с.
9. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Результаты исследований каменных и армокаменных кладок // Вестник МГСУ. 2014. №3. С. 99–106
10. Махатадзе Л. Н. Комплексный метод исследования сейсмостойкости каменных зданий. Тбилиси, 1983. 111 с.
11. Митрофанов В. П., Довженко О. А., Погребной В. В. Вариационный метод расчета прочности каменной кладки при местном сжатии //

Строительство, материаловедение, машиностроение : Сборник научных трудов. Вып. №32. Днепропетровск : ПГАСА. 2005. С. 76–82.

12. Митрофанов В.П. Теория идеальной пластичности как элементарная механика псевдопластического предельного состояния бетона: основы, ограничения, практические аспекты, совершенствование // Комунальное хозяйство городов : Республиканский межведомственный научно-технический сборник. Вып. 72. К. : Техніка. 2006. С. 6–26.

13. Будівництво у сейсмічних районах України: ДБН В.1.1-12:2006. - Офіц. вид. – [На заміну СНиП II-7-81 *; Чинні від 2007-01-02]. К. : Укрархбудінформ : Міноуд України, 2006. 82 с.

14. Старцев С. А., Сундукова Л. А. Усиление кирпичной кладки композитными матеріалами и винтовыми стежнями // Строительство уникальных зданий и сооружений. №6 (21). 2014. С. 17–31.

15. Сіка Україна: Офіційний сайт «Сіка Україна» / ООО «Сіка Україна». 2005. – Режим доступу: www.sika.ua.