

[https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11\(21\)-07](https://doi.org/10.36910/6775-2410-6208-2024-11(21)-07)

УДК 624.012:539.4

## ОПІР КАМ'ЯНИХ І ЗАЛІЗОБЕТОННИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДІАГОНАЛЬНОМУ РОЗКОЛЮВАННЮ

### RESISTANCE OF MASONRY AND REINFORCED CONCRETE MEMBERS TO DIAGONAL SPLITTING

**Довженко О.О., к.т.н., проф., Погрібний В.В., к.т.н., с.н.с.,  
Пенц М.В., аспірантка, Мищенко М.О., аспірант (Національний  
університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»)**

**Dovzhenko O.O., Ph.D. in Engineering, Associate Professor, Pohribnyi  
V.V., Ph.D. in Engineering, Senior Researcher, Pents M.B., Postgraduate  
Student, Myshchenko M.O., Postgraduate Student (National University  
«Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic»)**

*Розглядаються питання забезпечення цілісності кам'яних та залізобетонних елементів несучих систем будівель і споруд при дії навантаження, рівнодійна якого спрямована за діагоналлю в площині елемента. Найбільш поширеним є випадок спільної дії вертикальних і горизонтальних сил, котрі у сейсмічних районах будівництва в значній мірі впливають на несучу здатність конструкцій. Особлива увага приділена дрібнорозмірним елементам, до яких відноситься цегляна кладка, та залізобетону як композитному матеріалу. Відмічається складність їх напружено-деформованого стану при діагональному розколюванні. Опір оцінюється на основі розривних рішень у теорії пластичності.*

*The issue of ensuring the integrity of masonry and reinforced concrete load-bearing members of the structural systems of buildings under the action of a load whose resultant force is directed diagonally in the plane of the member is considered. The most common is the case of the combined action of vertical and horizontal forces, which in seismic construction areas significantly affect the bearing capacity of structures. Special attention is paid to small-sized members, which include masonry, and reinforced concrete as a composite material. This is due to the complexity of their stress-strain state when performing diagonal splitting (simultaneous shear in compressed areas and tear in the tension zone). The failure of load-bearing structures leads to accidents and the collapse of objects as a whole or their parts, threatens the safety of people and the environment, and the loss of material values. One of the ways to increase safety is a justified clarification of the definition of the bearing capacity of structures, which creates conditions for effective design. Taking into account that significant plastic strains occur during an earthquake, the expediency of applying the theory of plasticity to design the ultimate load of masonry walls, short reinforced concrete corbels, key joints of beams with slabs and columns, and*

*wall panels in which loss of bearing capacity through diagonal splitting is possible. Masonry and concrete are considered as a rigid-plastic body. Plastic strains are localized on the failure surface, adjacent areas are considered rigid. The principle of virtual velocities is applied, and the mathematical apparatus of the theory of plasticity is adapted to masonry and concrete, taking into account the specifics of their strength and strain properties. The bearing capacity of structures is determined from the condition of minimum capacity of plastic strain. Normal and tangential stresses on the shear surface in the compressed zones correspond to the strength condition. The results obtained by the variation method found experimental confirmation. Recommendations on constructive measures to improve serviceability are provided.*

*Ключові слова: кладка, залізобетон, сейсміка, деформація, зріз, відрив.*

*Keywords: masonry, reinforced concrete, seismicity, strain, shear, tear.*

**Вступ.** Для створення умов надійної експлуатації будівель і споруд та уникнення аварійних ситуацій особлива увага приділяється забезпеченню цілісності несучих конструкцій та їх з'єднань, відмова яких загрожує безпеці людей і довкілля. За досягнення конструкцією граничного стану першої групи відбувається її відмова-зрив, яка характеризується неможливістю подальшої експлуатації об'єкта і навіть призводить до припинення його існування взагалі. Підвищення безпеки потребує детального вивчення поведінки конструкцій і аналізу можливих випадків втрати несучої здатності з уточненням методів її визначення. При спільній дії вертикальних і горизонтальних (сейсмічних) сил і схемах передачі навантаження та спірання елементів, які визначають діагональний напрямок траєкторії головних напружень, реалізуються діагональне розколювання, одним із шляхів уникнення якого є розроблення додаткових конструктивних заходів з надійної експлуатації, про що засвідчено в [1].

**Аналіз останні досліджень.** Важливе значення приділяється конструкціям із дрібнорозмірних елементів, зокрема із цегли. В нормах [1] наведений мінімальний обсяг вимог щодо їх проектування, зведення, реконструкції та передбачається можливість обґрунтованого їх підвищення. Вплив горизонтального навантаження при розрахунках згідно з [2, 3] здійснюється шляхом врахування ексцентриситетів прикладання горизонтальних сил для визначення коефіцієнта зменшення несучої здатності на дію вертикальних сил. За постійно діючого вертикального навантаження допускається в розрахунках конструкцій замінювати розрахункову міцність кладки  $f_{kd1}$  на згин у площині руйнування, паралельній горизонтальному шву (за неперев'язаним перерізом), на підвищену умовну розрахункову міцність  $f_{kd1,app}$ . Однак, у нормах не наведені розрахункові схеми та не деталізовано алгоритм визначення

несучої здатності з урахуванням сейсмічної небезпеки. При дії сейсмічного навантаження виникає необхідність у забезпеченні несучої здатності з урахуванням вимог стійкості та монолітності конструкцій [4, 5]. У цьому напрямку в [6] для сейсмічних районів наведені найбільш характерні випадки пошкоджень та руйнування стін. Слід зазначити, що під час землетрусів спостерігаються значні пластичні деформації [7], що вказує на доцільність застосування теорії пластичності для розв'язання задач несучої здатності цегляних стін у зонах їх локалізації. Відомі випадки руйнування у межах похилої стиснутої смуги в коротких залізобетонних консолях [8] і швах шпонкових з'єднань [9], які можна класифікувати як діагональне розколювання.

Вказане вище обумовлює необхідність уточнення областей реалізації різних випадків можливого руйнування з використанням теорії пластичності для визначення несучої здатності кам'яних і залізобетонних конструкцій, а також стикових з'єднань із підвищеним опором зрізу з урахуванням специфіки напружено-деформованого стану в зоні руйнування.

**Постановка мети та задачі досліджень.** Визначення опору кам'яних і залізобетонних елементів при діагональному розколюванні, перевірка достовірності отриманих результатів та надання пропозицій з підвищення експлуатаційної придатності.

**Основні положення розрахунку.** Для визначення несучої здатності кам'яних стін при дії горизонтального (сейсмічного) навантаження, коротких консолей та шпонкових з'єднань при домінуванні деформації зсуву використовуються математичний апарат теорії пластичності, адаптований до кам'яної кладки та бетону, і розривні рішення [10 – 12]. Застосовується варіаційне обчислення, принцип віртуальних швидкостей, умова мінімуму потужності пластичної деформації, котрі визначають величину граничного навантаження. В якості умови пластичності прийнята умова міцності, котра геометрично представляє собою параболоїд обертавання.

При дії сейсмічного навантаження в горизонтальних перерізах над і під віконними отворами порушується суцільність розчинних швів і передача навантаження відбувається за площадками спірання перемичок та на ділянках стін, які примикають до отворів.

У [4, 5] відмічена діагональна направленість силових потоків із концентрацією напружень у місцях зміни жорсткості конструкції та її руйнування у напрямку рівнодійної сили.

Несуча здатність кам'яних стін в цьому випадку визначається на основі розв'язання задачі опору смуги при двосторонньому місцевому стиску з одночасним руйнуванням в зоні стиску та розтягу. За боковими гранями

клиноподібної стиснутої зони діють рівномірно розподілені дотичні й нормальні напруження, котрі встановлюються відповідно прийнятої умови міцності; в зоні відриву напруження дорівнюють міцності кладки на осевий розтяг.

Процес руйнування відбувається наступним чином: наближаючись одна до одної у вертикальному напрямку зі швидкістю  $V_1$  трикутні області зумовлюють рух бокових жорстких областей кладки в перпендикулярному напрямку зі швидкістю  $V_2$ .

Кінематична схема руйнування смуги наведена на рис. 1.

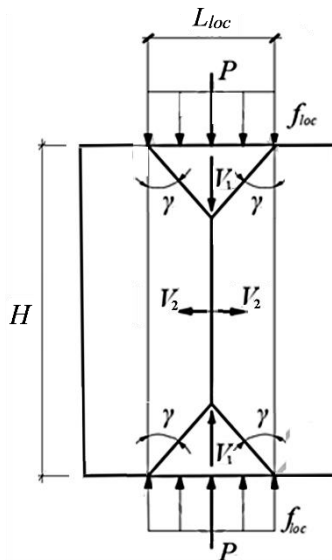


Рисунок 1 – Кінематична схема руйнування смуги

Граничні значення головних нормальних напружень  $\sigma_1 = P/A_d$ , які сприймає смуга, підраховуються за залежністю:

$$\sigma_1 = \left[ \frac{\tan(\gamma + \psi)}{\tan \gamma} - 1 \right] \left( d \frac{\sqrt{1 + 4 \tan^2 \psi}}{\tan \psi} - m \right) + \tan(\gamma + \psi) f_d \left( \frac{H}{L_{loc}} - \frac{1}{\tan \gamma} \right), \quad (1)$$

де  $A_d$  – площа поперечного перерізу смуги;  $\psi$  – кут між напрямком швидкості та площиною зсуву;  $\gamma$  – кут між поверхнею руйнування та

напрямок дії сили;  $m = f_d - f_t$ , тут  $f_d$  і  $f_t$  – міцність кладки при осьовому стиску та розтягу;  $H/L_{loc}$  – відношення висоти смуги до її ширини. Результати розрахунку наведені в [10].

Розташування в межах ділянки стіни зон стиску зі зсувною формою руйнування та розтягу з відривом, а також кінематична схема при діагональному розколюванні простінка наведені на рис. 2.

Ширина розрахункового елемента, на котрий передається навантаження, дорівнює  $L_{loc} = l_{sup} / \cos \varphi$ , де  $l_{sup}$  – довжина площадки спирання перемички,  $\varphi$  – кут рівнодійної навантаження до вертикалі, а висота смуги  $H = D - l_{sup} \tan \varphi$ , де  $D$  – довжина діагоналі простінка.

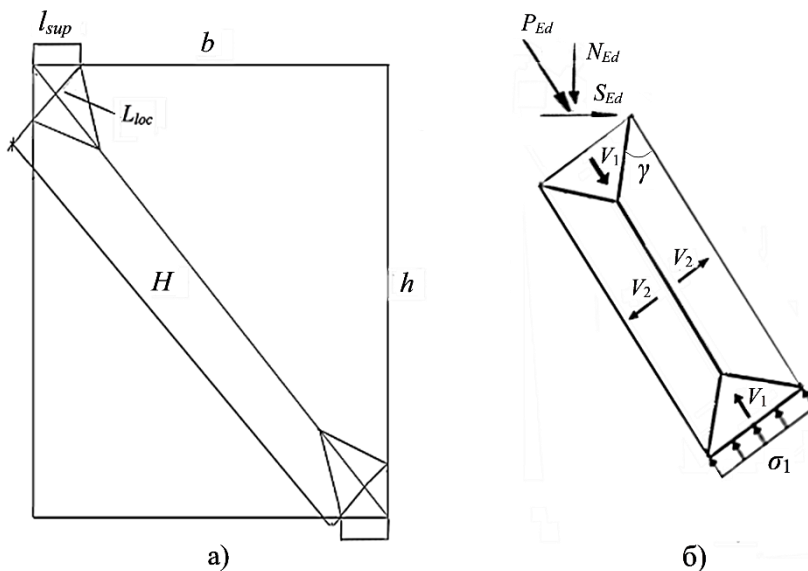


Рисунок 2 – Розташування в простінку стиснутих і розтягнутої зон (а) та кінематична схема руйнування (б)

Вертикальне зусилля з урахуванням впливу горизонтальної сили при діагональному розколюванні визначається за умови  $0,6 \leq S_{Ed} / N_{Ed} \leq 1$  із залежності:

$$N_{Rd} = \frac{k_m f_d l_{sup} t}{S_{Ed} / N_{Ed}}, \quad (2)$$

де  $k_m = (0,8 + 2f_t / f_d)(H / L_{loc})^{0,2}$  – коефіцієнт, який враховує вплив міцності кладки на розтяг та відношення  $h / l_{sup}$  на величину граничного опору;  $t$  – товщина стіни.

За розрахункове граничне зусилля  $N_{Rd}$  приймається менше значення із зусиль, отриманих при зрізі за похилим перерізом [10] і діагональному розколюванні.

Перевірка достовірності отриманих теоретичних результатів виконана за даними випробувань дослідних зразків серій RL [13], КРПУ, КРПО, КПП, КПК [14] з використанням методики RILEM TC [15] та ASTM E519 [16]. Довжина площадки передачі навантаження  $l_{sup}$  складає 65 мм. Навантаження передавалося за всією товщиною зразків. За характером прикладання навантаження випробування носить назву діагонального стиску.

При розрахунку кам'яних конструкцій міцність кладки при стиску є одним із важливих визначальних факторів. У НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» проводяться дослідження щодо встановлення розмірів і форми стандартного зразка для її експериментального визначення.

Результати порівняння опору кам'яних зразків, визначеного за запропонованим методом [10] та отриманого експериментально [13, 14] вказують на їх задовільну близькість: для 12 дослідних зразків середнє арифметичне відхилення відношення теоретичного опору до експериментального становить 0,982 з коефіцієнтом варіації 14,2 %.

В експериментальних дослідженнях зафіксовано «діагональне розколювання» в межах умовної смуги, котре можна розглядати як сукупність стиснутих трикутних зон біля опори та місця прикладання навантаження, з'єднаних площиною відриву в зоні розтягу. Ширина смуги відповідає границям площадки передачі навантаження. Руйнування дослідних зразків починалося з вдавлювання стиснутих клинів у кладку з подальшим переміщенням її бокових частин перпендикулярно до тріщини відриву, котра з'єднувала вершини клинів.

Розміщення найбільш напружених зон і траєкторії головних напружень у простінках (рис. 3) знайшли експериментальне підтвердження за характером руйнування.

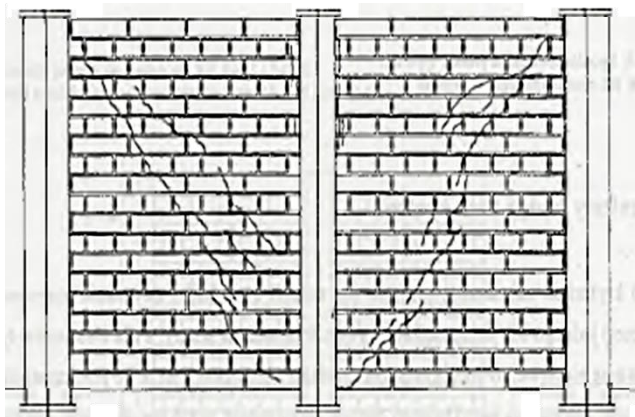


Рисунок 3 – Характер руйнування простінків у випробувальному стенді при сумісній дії горизонтального та вертикального навантаження [13]

Питання опору залізобетонних елементів при діагональному розколюванні виникає при розрахунку коротких консолей у межах руйнування за похилою стиснутою смугою та швів стикових шпонкових з'єднань із підвищеним опором зрізу із трапецієвидними та трикутними шпонками. У розрахунковій моделі, що розглядається в [9], несуча здатність визначається опором стиснутого підкосу між шпонками. Його ширина та кількість шпонок, які він охоплює, залежать від ширини шва, кроку шпонок і вмісту арматури. Дана модель ґрунтується на методах нижньої оцінки (статичному), запропонований же авторами підхід базується на кінематичному методі (верхньої оцінки) при діагональному розколюванні (рис. 4).

**Висновки.** Діагональне розколювання характеризується зрізом у стиснутих зонах та відривом в області розтягу, граничний стан в яких досягається одночасно. Для оцінювання опору кам'яних і залізобетонних елементів та шпонкових стикових з'єднань при діагональному розколюванні перспективним є застосування теорії пластичності, варіаційного обчислення та розривних рішень. З метою уникнення втрати несучої здатності шляхом діагонального розколювання необхідно підвищувати довжину площадки передачі навантаження на конструкцію та

передбачити при проектуванні конструктивні заходи, котрі збільшують довжину розрахункового перерізу в напрямку діагоналі, зокрема для стін ширина простінків повинна перевищувати їх висоту, що надає можливість використати ділянки стін під вікнами.

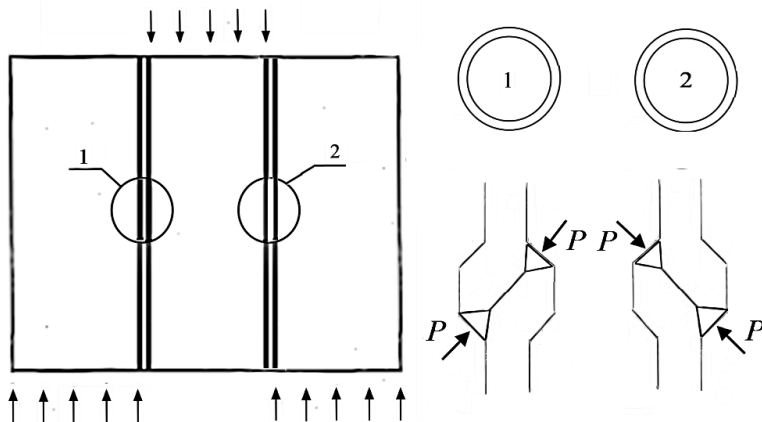


Рисунок 4 – Діагональне розколювання в шпонкових з'єднаннях панельних стін

## References

1. DBN V.1.1-12:2014 Budivnytstvo u seismichnykh raionakh Ukrainy. – K.: Minrehion Ukrainy. – 2014. – 110 s.
2. DBN V.2.6-162:2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Kam'iani ta armokam'iani konstruktsii. Osnovni polozhennia. – K.: Minrehionbud Ukrainy. – K.: 2011. – 98 s.
3. Eurocode 6: Design of masonry structures. – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures: EN 1996-1-1:2005. – Brussels: CEN. – 2005. – 123p.
4. Liu Z. Effects of size and position of openings on in-plane capacity of unreinforced masonry walls / Z. Liu, A. Crewe // Bull Earthquake Eng. – 2020. – Vol. 18. – Pp. 4783–4812.
5. Brzev S. Seismic design guide for masonry buildings / S. Brzev, D. Anderson. – Canadian Concrete Masonry Producers Association, 2018. – 104 p.
6. DSTU B V.1.1-28: 2010 Zakhyst vid nebezpechnykh heolohichnykh protsesiv, shkidlyvykh ekspluatatsiinykh vplyviv, vid pozhezhi. Shkala seismichnoi intensyvnosti. – K., Minrehionbud Ukrainy. – 2010. – 79 s.



7. Ashkynadze H.M. Zhelezobetonnye steny seismostoikykh zdanyi. Yssledovaniya y osnovy proektyrovaniya / H.M. Ashkynadze, M. Ye. Sokolov. – M., 1988. – 486 s.
8. Maksymovych B.Yu. Nesucha zdatnist korotkykh zalizobetonnykh konsoli: avtoref. dys ... kand. tekhn. nauk: spets. 05.23.01 «Budivelni konstruktсии, budivli ta sporudy» / B.Yu. Maksymovych. – Lviv: Nats. un-t «Lviv. Politekhnika», 2004. – 21 s.
9. Nielsen M.P. Limit Analysis and Concrete Plasticity; 3rd ed./ M.P. Nielsen, L.C. Hoang. – CRC Press, 2016. – 788 p.
10. Pohribnyi V.V. Metodolohiia rozrakhunku nesuchoi zdatnosti zalizobetonnykh i kam'ianykh konstruktсии z vykorystanniam umov ekstremumu deformuvannia: monohrafiia / V.V. Pohribnyi. – Poltava: PP «Astraiia», 2022. – 388 s.
11. Dovzhenko O. Work of masonry under the combined action of vertical and horizontal loads: an analysis of experimental studies / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, D. Usenko, M. Qiniso // Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo). Poltava, 2020. – Vyp. 2(55). – Pp. 44–51.
12. Dovzhenko O. The masonry calculation strength under the vertical and horizontal loads combined action by the variational method in the plasticity theory / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, V. Usenko, D. Usenko // Zbirnyk naukovykh prats (haluzeve mashynobuduvannia, budivnytstvo). Poltava, 2021. – Vyp. 2(57). – Pp.26-31.
13. Piekarczyk A. Badania początkowej wytrzymałości muru niezbrojonego na ścinanie w kierunku prostopadłym do spoin wsporny / A. Piekarczyk // Zeszyty naukowe politechniki śląskiej, seria: budownictwo. – 2000. – Vol. 1482. – S. 187–197.
14. Derkach V.N. Anizotropiia prochnosti kamЕННОi kladky na rastiazhenye pry raskalыvaniy / V.N. Derkach // Nauchno-tekhnycheskye vedomosti SPbHPU. – Nauka y obrazovanye. – 2012. – №2 (147). – S. 259–265.
15. RILEM TC. 1994. 76-LUM. Diagonal tensile strength tests of small wall specimens, 1991. In RILEM, Recommendations for the Testing and Use of Constructions Materials. London: E&FN SPON. – Pp. 488–489.
16. ASTM E 519–02, Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. In Annual Book of ASTM Standards. West Conshohock, PA: ASTM International, 2002.

## **Література**

1. ДБН В.1.1-12:2014 Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіон України. – 2014. – 110 с.
2. ДБН В.2.6-162:2010. Конструкції будинків і споруд. Кам'яні та армокам'яні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України. – К.: 2011. – 98 с.
3. Eurocode 6: Design of masonry structures. – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures: EN 1996-1-1:2005. – Brussels: CEN. – 2005. – 123p.

4. Liu Z. Effects of size and position of openings on in-plane capacity of unreinforced masonry walls / Z. Liu, A. Crewe // *Bull Earthquake Eng.* – 2020. – Vol. 18. – Pp. 4783–4812.
5. Brzev S. Seismic design guide for masonry buildings / S. Brzev, D. Anderson. – Canadian Concrete Masonry Producers Association, 2018. – 104 p.
6. ДСТУ Б В.1.1-28: 2010 Захист від небезпечних геологічних процесів, шкідливих експлуатаційних впливів, від пожежі. Шкала сейсмічної інтенсивності. – К., Мінрегіонбуд України. – 2010. – 79 с
7. Ашкинадзе Г.М. Железобетонные стены сейсмостойких зданий. Исследования и основы проектирования / Г.М. Ашкинадзе, М.С. Соколов. – М., 1988. – 486 с.
8. Максимович Б.Ю. Несуча здатність коротких залізобетонних консолей: автореф. дис ... канд. техн. наук : спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Б.Ю. Максимович. – Львів: Нац. ун-т «Львів. Політехніка», 2004. – 21 с.
9. Nielsen M.P. Limit Analysis and Concrete Plasticity; 3rd ed./ M.P. Nielsen, L.C. Hoang. – CRC Press, 2016. – 788 p.
10. Погрібний В.В. Методологія розрахунку несучої здатності залізобетонних і кам'яних конструкцій з використанням умов екстремуму деформування: монографія / В.В. Погрібний. – Полтава: ПП «Астрія», 2022. – 388 с.
11. Dovzhenko O. Work of masonry under the combined action of vertical and horizontal loads: an analysis of experimental studies / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, D. Usenko, M. Qinisho // *Збірник наукових праць (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава, 2020. – Вип. 2(55)'. – Pp. 44–51.
12. Dovzhenko O. The masonry calculation strength under the vertical and horizontal loads combined action by the variational method in the plasticity theory / O. Dovzhenko, V. Pohribnyi, V. Usenko, D. Usenko // *Зб. наук. пр. (галузеве машинобудування, будівництво)*. – Полтава, 2021. – Вип. 2 (57)'. – Pp. 26–31.
13. Piekarczyk A. Badania początkowej wytrzymałości muru niezbrojonego na ścinanie w kierunku prostopadłym do spoin wsporny / A. Piekarczyk // *Zeszyty naukowe politechniki śląskiej, seria: budownictwo*. – 2000. – Vol. 1482. – S. 187–197.
14. Деркач В.Н. Анизотропия прочности каменной кладки на растяжение при раскалывании / В.Н. Деркач // *Научно-технические ведомости СПбГПУ*. – Наука и образование. – 2012. – №2 (147). – С. 259–265.
15. RILEM TC. 1994. 76-LUM. Diagonal tensile strength tests of small wall specimens, 1991. In RILEM, Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials. London: E&FN SPON. – Pp. 488–489.
16. ASTM E 519–02, Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. In Annual Book of ASTM Standards. West Conshohock, PA: ASTM International, 2002.