

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВ ПЕРЕКОСА КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СДВИГЕ ПОПЕРЕК ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ШВОВ

Демчук И.Е.

Введение. Случай нагружения кладки поперечной силой, направленной перпендикулярно горизонтальным швам, до настоящего времени изучен недостаточно. В Еврокоде 6 [1] отсутствуют данные о прочности кладки на сдвиг поперек горизонтальных швов. При расчете узлов сопряжения стен на сдвиг в качестве прочности кладки при сдвиге по перевязанному сечению Еврокод 6 [1] рекомендует принимать характеристическое значение начальной прочности кладки при сдвиге вдоль горизонтальных швов. В отечественных нормах [2, 3] используются установленные значения прочности кладки при срезе по перевязанному сечению, зависящие не от марки применяемого раствора, а от марки кладочного изделия. Такой же подход используется в британских [4] и польских [5] нормах.

Что касается деформационных критериев при расчете кладки, то важнейшим показателем являются угловые деформации γ_{sd} при действии на здание внешних усилий в стенах (рисунок 1):

$$\gamma_{sd} = \frac{\tau}{G} \quad (1)$$

где: τ – касательные напряжения в каменной кладке;

G – модуль сдвига каменной кладки.

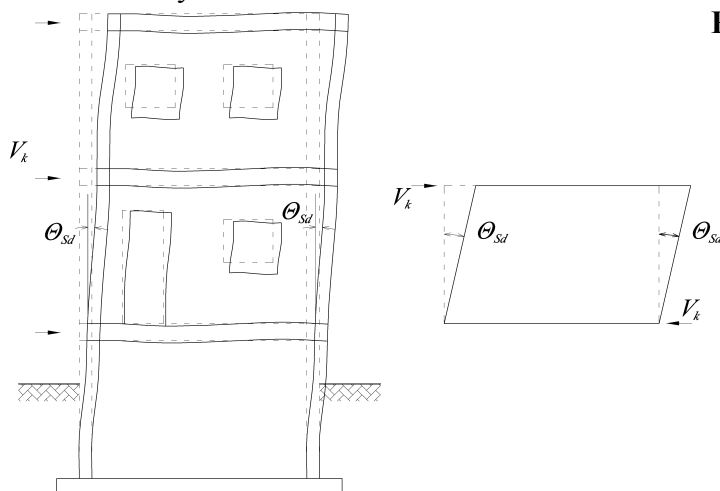


Рисунок 1. – Сдвиговые деформации каменных стен при действии

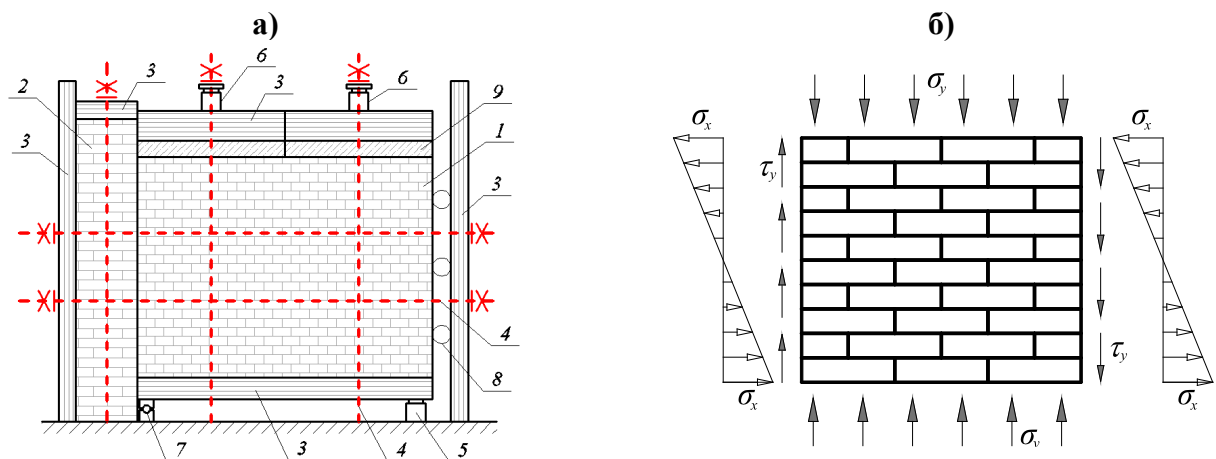
на здание горизонтальных нагрузок [32]

Появление трещин в каменной кладке, работающей в стадии эксплуатации, исключается, если соблюдается условие:

$$\gamma_{sd} \leq \gamma_{adm} \quad (2)$$

где γ_{adm} – предельное значение угла сдвиговых деформаций каменной кладки (угла перекоса), которое зависит от вида и прочности кладочных материалов, вида растворных швов, величины сжимающих напряжений и других факторов.

Следует отметить, что в технической литературе содержится ограниченная информация о предельных значениях угла сдвиговых деформаций каменной кладки. В нормах СНиП II-22-81 [3] и Еврокоде 6 [1] числовые значения γ_{adm} отсутствуют, что затрудняет выполнение проверки предельного состояния каменной кладки при сдвиге на основании численных расчетов с применением современных вычислительных средств. Обширные экспериментальные исследования работы каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов проводились еще в 60-х гг. А.А. Шишкиным [6]. Основной целью данных исследований являлось получение предельных значений углов перекоса при деформировании кладки поперек горизонтальных швов. В результате для неармированной кладки была получена величина предельного перекоса кладки, соответствующая моменту появления трещин, равная 1/300. Схема испытаний и характерные формы развития трещин по результатам вышеописанных исследований представлены на рисунке 2, а.



1 – образец внутренней стены; 2 – простенок наружной стены; 3 – стальные жесткие траверсы; 4 – стальные тяжи; 5 – механический домкрат; 6 – гидравлические домкраты; 7 – цилиндрический шарнир; 8 – шарнирные опоры; 9 – плиты перекрытия
 а) – исследования А.А. Шишкина [6]; б) – исследования J. Kubica [7]

Рисунок 2. – Исследования предельных значений углов перекоса

Исследованиям данного вопроса посвящены также современные работы В.Н. Деркача [8].

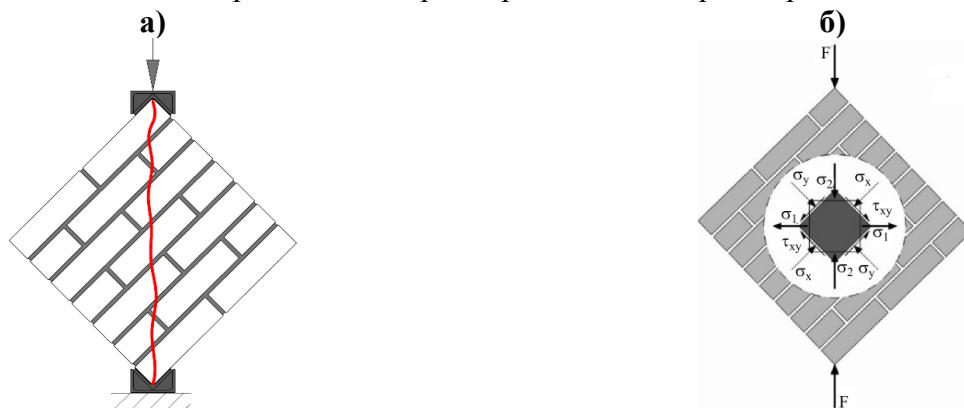


Представляют интерес и исследования О.В. Кабанцева [9], который испытывал образцы кладки из керамического кирпича при действии сжимающей нагрузки вдоль диагонали образца (см. рисунок 3).

Рисунок 3. – Испытания кладки в исследованиях О.В. Кабанцева [9]

По схеме диагонального сжатия проводили испытания еще в 60-х гг. С.В. Поляков [10] и В.И. Коноводченко [11] в своих совместных исследованиях. По данной методике проводились испытания во многих зарубежных и отечественных исследованиях, посвященных в том числе и оценке модуля сдвига [12-14].

Методика испытаний образцов кладки на диагональное сжатие приведена в европейских нормах RILEM TC [15]. При действии сжимающего усилия по диагонали опытного образца кладки в ней возникает напряженное состояние, приближенное к случаю сдвига поперек горизонтальных швов. Разрушение кладки вызывается образованием трещины по диагонали образца (рисунок 4). Методика аналогична используемой в американских нормах ASTM E 519 [16]. Основным недостатком метода является сложность создания в каменной кладке нормальных сжимающих напряжений поперек горизонтальных растворных швов.



а) – схема нагружения образца кладки; б) – напряженное состояние в центральной области образца
Рисунок 4. – Определение прочности при сдвигах в соответствии со стандартами RILEM TC [15] и ASTM E 519-02 [16]

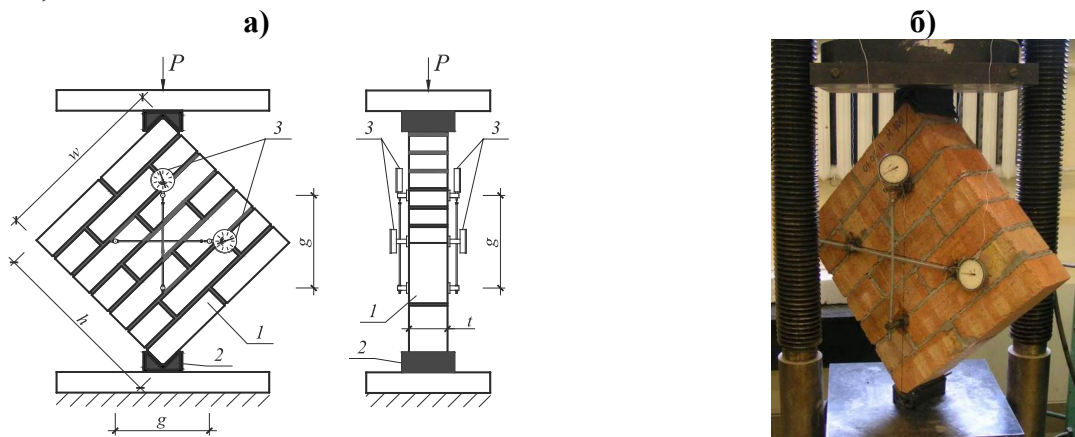
Безусловно, наиболее полные данные о характере деформирования и разрушения каменной кладки при сдвиге, а также ее прочностных и деформационных характеристиках можно получить путем физического эксперимента. Так как физические эксперименты достаточно трудоемки и дорогостоящи, а главное, параметрически ограничены, то эффективным дополнением к физическим экспериментам является численный эксперимент. Корректная математическая

модель является удобным инструментом для анализа влияния выбранных параметров и их сочетаний на напряженно-деформированное состояние каменной кладки. При этом удастся достаточно точно выявить картину НДС опытных образцов и спрогнозировать возможный характер их разрушения.

Современные программные комплексы позволяют создавать адекватные численные модели, отражающие в полной мере поведение каменной кладки. Поэтому для инженера при расчете кладки не составляет большой сложности оценить, например, предельные угловые деформации в конструкции.

Экспериментальные исследования

Испытания выполнялись на образцах каменной кладки, имеющих близкую к квадрату форму (с размером сторон около 500 мм) и включающих в себя от пяти до семи слоев кладочных элементов в зависимости от геометрических размеров кладочного элемента (см. рисунок 5). Для изготовления образцов использовались полнотелые и пустотелые (18%) кирпичи производства ОАО "Брестский КСМ" (РБ) на стандартных растворах разной прочности при сжатии $f_m=3,1, 7,9$ и $10,9$ МПа.



1 – образец кладки; 2 – передаточный опорный башмак;
3 – индикаторы перемещений часового типа с ценой деления 0,001 мм
а) – схема испытания; б) – опытный образец в испытательной установке

Рисунок 5. – Испытание образца при диагональном сжатии

Определение деформаций кладки в вертикальном и горизонтальном направлении производилось с помощью индикаторов перемещений часового типа с ценой деления 0,001 мм. Нагружение опытных образцов производилось при помощи гидравлического пресса П-125.

На основании испытаний определялся угол сдвиговых деформаций γ по следующей зависимости:

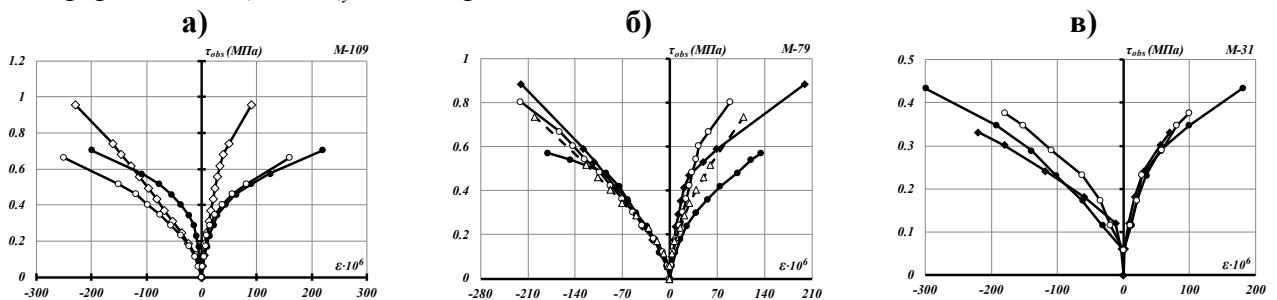
$$\gamma = \frac{\Delta V + \Delta H}{g} \quad (3)$$

где ΔV - деформации сжатия по вертикали (мм),

ΔH - деформации растяжения по горизонтали (мм),

g - расстояние между индикаторами перемещений (мм).

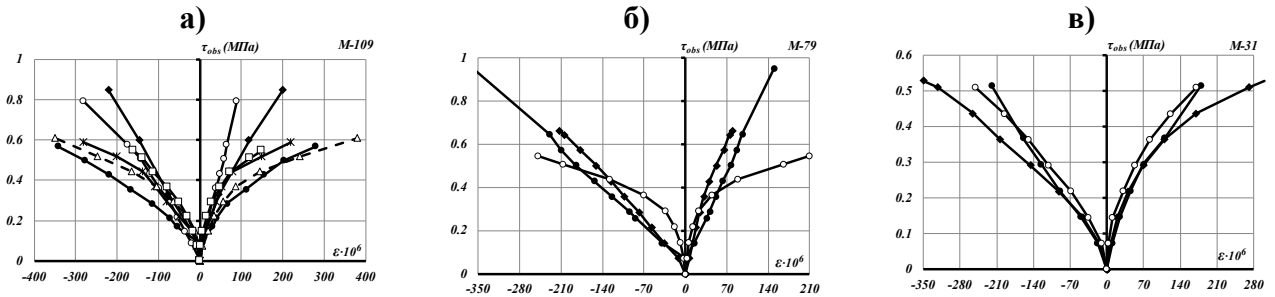
На рисунке 6 представлены диаграммы зависимости «напряжения сдвига τ_{obs} – относительные деформации $\varepsilon_{obs,x}$ и $\varepsilon_{obs,y}$ » для образцов из полнотелых кладочных элементов.



а) – при прочности раствора $f_m = 10,9$ МПа; б) – $f_m = 7,9$ МПа; в) – $f_m = 3,1$ МПа

Рисунок 6. – Зависимости напряжений сдвига τ_{obs} от относительных деформаций ε образцов кладки из полнотелых кладочных элементов

На рисунке 7 представлены диаграммы зависимости «напряжения сдвига τ_{obs} – относительные деформации $\varepsilon_{obs,x}$ и $\varepsilon_{obs,y}$ » для образцов из пустотелых кладочных элементов.



а) – при прочности раствора $f_m = 10,9$ МПа; б) – $f_m = 7,9$ МПа; в) – $f_m = 3,1$ МПа

Рисунок 7. – Зависимости напряжений сдвига τ_{obs} от относительных деформаций ε образцов кладки из пустотелых кладочных элементов

По результатам экспериментальных исследований были получены значения предельных угловых деформаций для кладок из полнотелых и пустотелых керамических кирпичей (таблица 1).

Таблица 1 – Результаты определения значений предельного угла сдвиговых деформаций образцов кладки

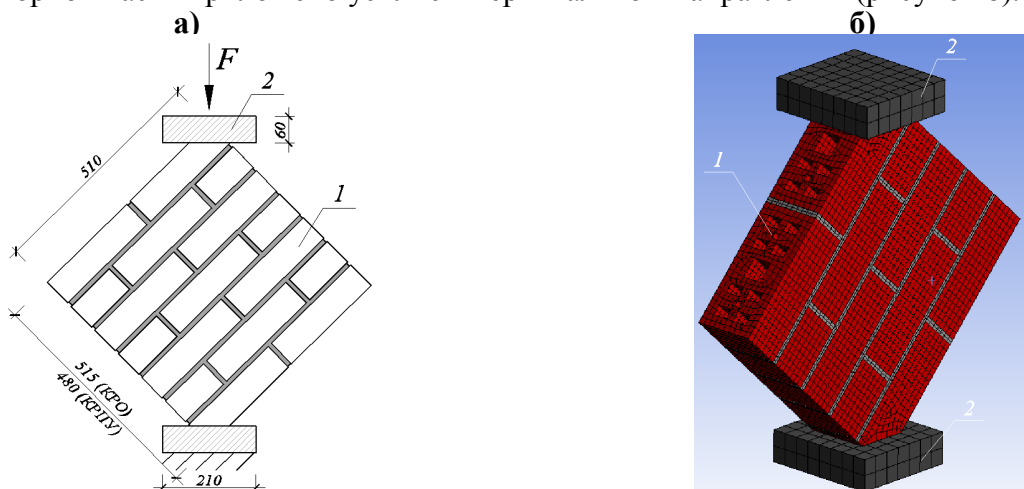
| Вид кладочного элемента | Прочность кладочного раствора при сжатии f_m (МПа) | Значения предельного угла сдвиговых деформаций γ_{mv} |
|--------------------------------|--|--|
| Полнотелый керамический кирпич | 10,9 | 3,8E-04 |
| | 7,9 | 3,4E-04 |
| | 3,1 | 3,5E-04 |
| Пустотелый керамический кирпич | 10,9 | 4,9E-04 |
| | 7,9 | 4,2E-04 |
| | 3,1 | 4,9E-04 |

Таким образом, прочность кладочного раствора f_m существенно не отразилась на значениях предельных углов сдвиговых деформаций каменной кладки γ_{adm} , которые находились в пределах $0,34 \dots 0,49 \cdot 10^{-3}$.

Численное моделирование

Численный анализ проводился в среде Ansys Workbench, где рассматривалась объемная задача с использованием конечного элемента (КЭ) SOLID65, допускающего учет трещинообразования, и контактных конечных элементов CONTA174/TARGE170.

Размер КЭ для образца был принят равным 15 мм, для плит пресса – 40 мм. КЭ-модель закреплена в нижней опорной части от перемещений в трех ортогональных направлениях. К верхней опорной части приложено усилие в вертикальном направлении (рисунок 8).



1 – образец кладки; 2 – опорные плиты

а) – схема испытаний; б) – КЭ-модель кладки из пустотелого кирпича

Рисунок 8 – Численные исследования каменной кладки при действии сжимающего усилия вдоль диагонали

Контакт между кладочными элементами и раствором задавался с использованием опции «frictional» с соответствующим коэффициентом трения и с учетом начального сопротивления сдвигу. Контакт между образцом и плитами пресса задавался с использованием опции «frictional» с коэффициентом трения 0.2.

Значения начального сопротивления сдвигу (f_{v0}) и угла внутреннего трения (α) были приняты на основании собственных ранее проведенных экспериментальных исследований [17].

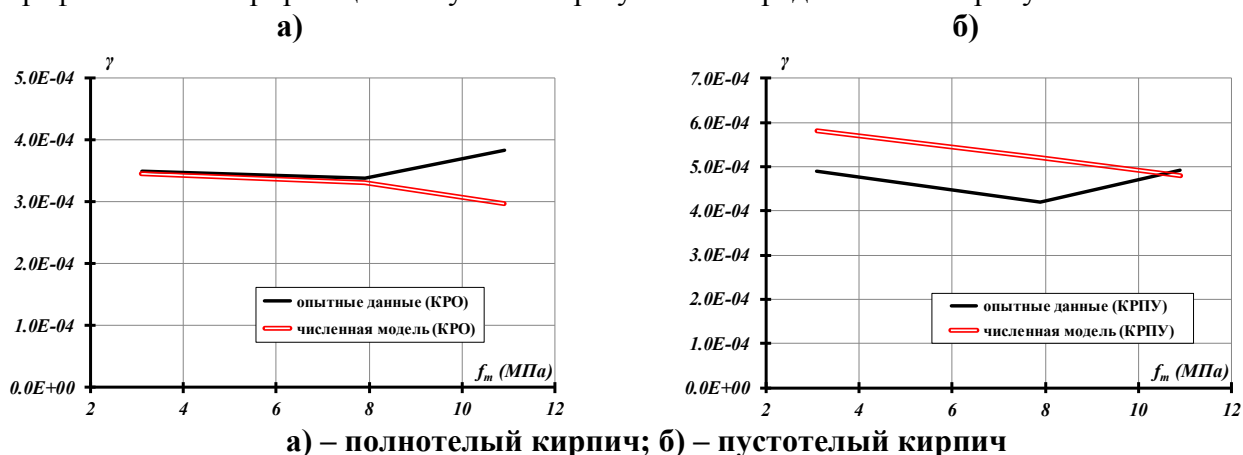
В таблице 2 представлено численное сравнение данных, полученных экспериментально и по расчету.

Таблица 2 – Результаты сопоставления экспериментальных и теоретических значений предельного угла сдвиговых деформаций образцов кладки

| Вид кладочного элемента | Прочность кладочного раствора при сжатии f_m (МПа) | Значения предельного угла сдвиговых деформаций (эксперимент) | Значения предельного угла сдвиговых деформаций (численная модель) | Отклонение % |
|--------------------------------|--|--|---|--------------|
| | | γ_{mv} | γ_{cal} | |
| Полнотелый керамический кирпич | 10,9 | 3,8E-04 | 3,0E-04 | -23 |
| | 7,9 | 3,4E-04 | 3,3E-04 | -2 |
| | 3,1 | 3,5E-04 | 3,5E-04 | -1 |
| Пустотелый керамический кирпич | 10,9 | 4,9E-04 | 4,9E-04 | -3 |
| | 7,9 | 4,2E-04 | 4,2E-04 | 24 |
| | 3,1 | 4,9E-04 | 4,9E-04 | 18 |

Из анализа числовых значений полученных характеристик можно сделать вывод об удовлетворительной сходимости результатов.

Графическая интерпретация полученных результатов представлена на рисунке 9.



а) – полнотелый кирпич; б) – пустотелый кирпич

Рисунок 9 – Сопоставление экспериментальных и теоретических значений предельного угла сдвиговых деформаций

Заключение

1. Предельные значения углов сдвиговых деформаций γ_{adm} каменной кладки из керамических кладочных изделий на стандартных растворных швах не зависят от прочности кладочного раствора. Для кладки из полнотелого кирпича значения γ_{adm} составляют $3,5 \dots 3,8 \cdot 10^{-4}$, для кладки из пустотелого кирпича $\gamma_{adm} = 4,4 \dots 4,9 \cdot 10^{-4}$.

2. Определение предельных значений углов сдвиговых деформаций γ_{adm} можно выполнять на основе расчетного анализа КЭ микромоделли каменной кладки, базирующейся на решении нелинейной контактной задачи с учетом трения и сцепления между кладочными элементами и растворными швами. Сопоставление результатов численного и физического эксперимента показало их удовлетворительное согласование.

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Часть 1-1: Общие правила для армированных и неармированных конструкций: СТБ EN 1996-1-1:2008. – Введ.1.07.2009. – Минск: Госстандарт, 2009. – 128с.
2. Каменные и армокаменные конструкции: СНиП II-В.2-71. – Введ. 01.07.1972. - М: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР: Стройиздат, 1972. – 30 с.
3. Каменные и армокаменные конструкции: СНиП II-22-81* (с изм. №1 и №2). – Введ. 01.01.1983. - М: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко Госстроя СССР: ФГУП ЦПП, 2004. – 40 с.
4. BS 5628. Part 1. Structural use of unreinforced masonry. BSI, London 1992
5. PN-B-03002:2007. Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie.
6. Шишкин, А.А. Причины появления трещин в каменных и блочных зданиях повышенной этажности с несущими поперечными стенами и методы их устранения / А.А. Шишкин // Анализ причин аварий строительных конструкций. Выпуск 4. – ЦНИИСК. М.: Издательство литературы по строительству, 1968. – С. 4-24.
7. Kubica J. (2003): Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi przemieszczeniami podłoża. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 196 s.
8. Деркач, В.Н. Экспериментальные исследования влияния каменного заполнения на сдвиговую жесткость каркасов зданий / В.Н. Деркач, Р.Б. Орлович // Промышленное и гражданское строительство. - 2014. -№11. -С.53-57.
9. Кабанцев, О.В. Пластическое деформирование и разрушение каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния [Текст] / О.В. Кабанцев // Вестник МГСУ. – 2016. – №2. – С. 34-48.
10. Поляков, С.В. Прочность и деформации квадратных виброкирпичных панелей при перекосе в плоскости стены. Прочность вертикальных стыков [Текст] / С.В. Поляков, В.И. Коноводченко. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 149-165.
11. Коноводченко, В.И. Прочность и деформации при центральном сжатии панелей из кладки с косым расположением кирпича [Текст] / В.И. Коноводченко // Сейсмостойкость сборных крупноэлементных зданий. – М.: Госстройиздат, 1963. – С. 119-130.
12. Jasiński R., Piekarczyk A., Kubica J.: Badania początkowej wytrzymałości muru na ścinanie wg zaleceń RILEM LUMB 6. XLVII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. Opole - Krynica 2001, t.3,s. 353 - 360.
13. Szarliński J., Winnicki A., Podleś K.: Konstrukcje z betonu w płaskich stanach. Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
14. Lewicki B., Drobiec Ł., Gajownik R., Jasiński R., Kubica J., Kubiak D., Piekarczyk A., Sieczkowski J.: Rozszerzenie podstaw naukowych ustaleń Eurokodu 6 „projektowanie konstrukcji murowych. Komentarz naukowo-badawczy do PN-EN 1996-1-1:2008, PN-EN 1996-2:2008 i PN-EN 1996-3:2008. Wydawnictwo ITB. Warszawa 2008
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, 488–489.
16. American Society for Testing and Materials (ASTM). 2002. 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.
17. Демчук, И.Е. Исследование прочности сцепления растворов в каменной кладке / И.Е. Демчук, В.Н. Деркач // Вестник Брестского государственного технического университета. – 2012. – №1(73): Строительство и архитектура. – С.71-76.