

**Демчук Игорь Евгеньевич**, главный инженер проекта, Филиал РУП «Институт БелНИИС» – Научно-технический центр, г. Брест (Беларусь)

**Igor Demchuk**, Project Engineer, Branch office of «Institute BelNIIS» RUE – Scientific-Technical Center, Minsk (Belarus)

## **ПРОЧНОСТЬ И ДЕФОРМАЦИИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО КИРПИЧА ПРИ СДВИГЕ ПОПЕРЕК ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ШВОВ**

## **STRENGTH AND DEFORMATION OF MASONRY FROM CERAMIC BRICKS IN SHEAR ACROSS HORIZONTAL JOINTS**

### **АННОТАЦИЯ**

*Выявлена проблема отсутствия данных о прочности кладки и ее деформационных характеристиках при сдвиге поперек горизонтальных швов в действующих нормативных документах. В то же время в исследованиях многих авторов содержится достаточно результатов, позволяющих оценить значимость рассматриваемых характеристик. В рамках настоящего исследования цель состояла в оценке возможности использования численных методов расчета при определении прочностных и деформационных характеристик каменной кладки, поскольку проведение физических экспериментов является дорогостоящим при анализе большого количества параметров. В результате были выполнены экспериментальные и численные исследования значений прочности при сдвиге, модуля сдвига и предельного угла сдвиговых деформаций при сдвиге поперек горизонтальных швов кладки, выполненной из керамических полнотелых и пустотелых кладочных изделий. Были разработаны численные микро-модели образцов каменной кладки на основе проведенных экспериментальных исследований.*

Верификационные исследования показали удовлетворительную сходимость численных моделей с результатами экспериментальных исследований. При моделировании сдвига поперек горизонтальных растворных швов было определено влияние уровня сжимающих напряжений и соотношения размеров сторон опытных образцов на деформационные и прочностные характеристики кладки, что экспериментальным путем выполнить достаточно сложно. Прочность каменной кладки при сдвиге и предельные значения угла сдвиговых деформаций снижаются при увеличении соотношения сторон опытного образца. При уровнях обжатия каменной кладки из полнотелого кирпича более 30% прочности при сжатии, а кладки из пустотелого кирпича – более 70%, имеет место резкое падение значения прочности каменной кладки при сдвиге.

## **ABSTRACT**

*The problem of lack of data on shear strength of masonry and its deformation characteristics in shear across horizontal joints in the existing normative documents has identified. At the same time, sufficient results in researches of many authors provide to assess the importance of the considered characteristics. In this study the aim was to assess the possibility of using numerical methods of calculation in determining the strength and deformation characteristics of masonry, since conducting physical experiments is expensive when analyzing large number of parameters. In results experimental and numerical studies of shear strength, shear modulus and shear strain angles in shear across horizontal mortar joints of masonry from ceramic solid and cellular units were carried out. Based on experimental studies numerical micro-models of masonry specimens were developed. Verification studies have shown a satisfactory convergence of numerical models with experimental results. In modeling shear across a horizontal mortar joints, it was determined the influence of the level of compressive stress and the ratio of the sides size of specimens on the deformation and strength characteristics of masonry, which experimentally is quite difficult to perform. The shear strength and shear strain angles decrease with increase of the aspect ratio of the specimen. At levels of compression masonry from solid bricks more*

*than 30% of the compressive strength and masonry of hollow blocks—more than 70%, there is a sharp drop in the values of shear strength of masonry.*

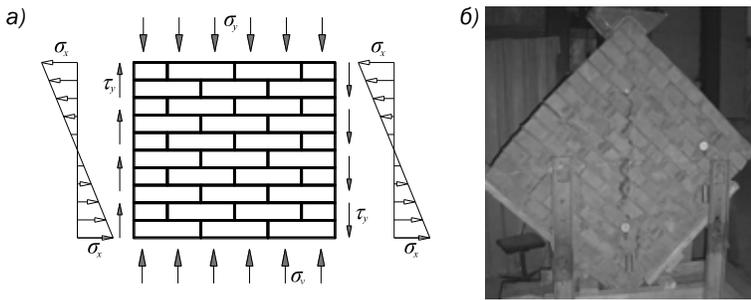
**Ключевые слова:** каменная кладка, прочность при сдвиге, модуль сдвига, предельный угол сдвиговых деформаций, полнотелый керамический кирпич, пустотелый керамический кирпич.

**Keywords:** masonry, shear strength, shear modulus, shear strain angles, solid ceramic brick, hollow ceramic brick.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Случай нагружения кладки поперечной силой, направленной перпендикулярно горизонтальным швам, до настоящего времени изучен недостаточно, поэтому 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.

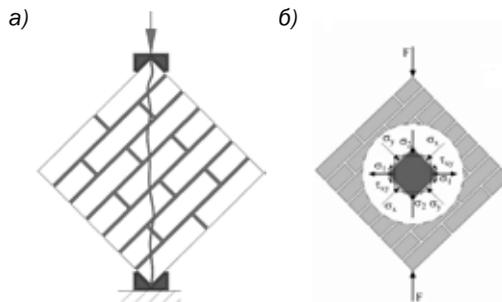
Обширные исследования работы каменной кладки при сдвиге перпендикулярно горизонтальным швам были выполнены в работах J. Kubica [6]. Испытаниям подвергались шесть типов кладок разной формы и размеров, среди которых были образцы, выполненные из полнотелого кирпича на цементном растворе. Опытные образцы испытывались на сдвиг поперек горизонтальных растворных швов без обжатия или с обжатием (рисунок 1, а). Представляют интерес также исследования О.В. Кабанцева [7], который рассматривал образцы кладки из керамического кирпича при действии сжимающей нагрузки вдоль диагонали образца (см. рисунок 1, б).



**Рисунок 1.** Испытание образца на сдвиг поперек горизонтальных растворных швов сечению: а) исследования J. Kubica [6], б) исследования О. В. Кабанцева [7]

По схеме диагонального сжатия проводили испытания еще в 60-х гг. С. В. Поляков [8] и В. И. Коноводченко [9] в своих совместных исследованиях. По данной методике проводились испытания во многих зарубежных и отечественных исследованиях, посвященных в том числе и оценке модуля сдвига [10–12].

Методика испытаний образцов кладки на диагональное сжатие приведена в европейских нормах RILEM TC [13]. 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 2). Методика аналогична используемой в американских нормах ASTM E519 [14].

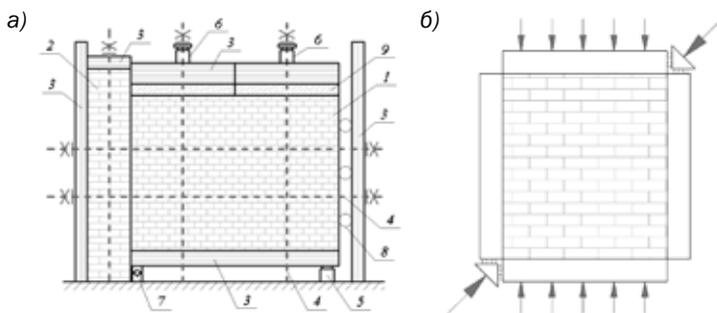


**Рисунок 2.** Определение прочности при сдвиге в соответствии со стандартами RILEM TC [13] и ASTM E519-02 [14]: а) схема нагружения образца кладки, б) напряженное состояние в центральной области образца

Основным недостатком метода является сложность создания в каменной кладке нормальных сжимающих напряжений поперек горизонтальных растворяющих швов.

В отечественной практике (60–70-е гг.) для испытаний кладки с обжатием использовались крупные фрагменты стен, как в исследованиях А. А. Шишкина [15] или Ю. В. Измайлова [16] (рисунок 3, а). Дополнительно в исследованиях Ю. В. Измайлова [16] варьировались соотношения сторон опытных образцов.

В Европе в конце 90-х гг. был разработан немецкий стандарт DIBt [17] на испытание каменных кладок при сдвиге с обжатием (рисунок 3, б). Причем при необходимости приложения вертикальной сжимающей нагрузки такая методика испытания является наиболее удобной, что подтвердили исследования М. Rossbach, U. Schmidt и P. Schubert [18] на кладках из поризованных керамических камней.



- 1 – образец внутренней стены; 2 – простенок наружной стены; 3 – жесткие траверсы; 4 – стальные тяжи; 5 – механический домкрат; 6 – гидравлические домкраты; 7 – цилиндрический шарнир; 8 – шарнирные опоры; 9 – плиты перекрытия

**Рисунок 3.** Определение прочности при сдвиге с обжатием:

а) исследования А. А. Шишкина [15], б) в соответствии со стандартом DIBt [17]

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

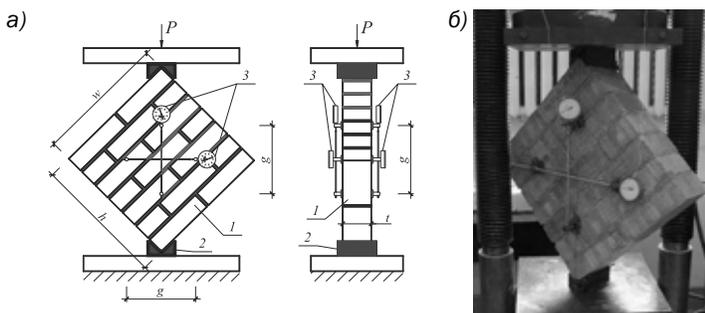
эксперименты достаточно трудоемки и дорогостоящи, а главное, параметрически ограничены, то эффективным дополнением к физическим экспериментам является численный расчет. Корректная математическая модель является удобным инструментом для анализа влияния выбранных параметров и их сочетаний на напряженно-деформированное состояние каменной кладки. При этом удается достаточно точно выявить картину НДС опытных образцов и спрогнозировать возможный характер их разрушения.

В рамках настоящего исследования проводились физические испытания образцов кладки на диагональное сжатие без обжатия и последующее сравнение с результатами численных расчетов. С учетом разработанных КЭ-моделей были произведены проверки предельного состояния несущей способности каменных стен при сдвиге на основе деформационного критерия прочности каменной кладки с учетом варьирования соотношения размеров сторон опытных образцов, а также уровня обжатия кладки при действии сдвигающего усилия перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов (диагональном сжатии).

## **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 4). 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.

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



1 – образец кладки; 2 – передаточный опорный башмак;  
3 – индикаторы перемещений часового типа с ценой деления 0.001 мм

**Рисунок 4.** Испытание образца при диагональном сжатии:  
а) – схема испытания; б) – опытный образец в испытательной установке

На основании испытаний определялась прочность кладки при сдвиге  $f_{vv}$ :

$$f_{vv} = \frac{0.707 \cdot F_{\max}}{A_n} \quad (1)$$

где  $F_{\max}$  – разрушающая нагрузка,

$A_n$  – площадь образца (нетто), определяемая по следующей зависимости:

$$A_n = \left( \frac{w+h}{2} \right) \cdot t \cdot n \quad (2)$$

где  $w$  – ширина образца,

$h$  – высота образца,

$t$  – толщина образца,

$n$  – коэффициент, учитывающий пустотность кладочных элементов:

– для полнотелого кирпича –  $n=1$ ;

– для кирпича пустотностью 18% –  $n=0,82$ ;

Угол сдвиговых деформаций  $\gamma$  определялся по следующей зависимости:

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

где  $\Delta V$  – деформации сжатия по вертикали (мм),  
 $\Delta H$  – деформации растяжения по горизонтали (мм),  
 $g$  – расстояние между индикаторами перемещений (мм).  
 Модуль сдвига  $G$  определяется по следующей зависимости:

$$G = \frac{f_{vv}}{\gamma} \quad (4)$$

По результатам экспериментальных исследований были получены значения прочности при сдвиге, модуля сдвига, предельных угловых деформаций для кладок из полнотелых и пустотелых керамических кирпичей (таблица 1).

Таблица 1

**Результаты определения прочностных и деформационных характеристик образцов кладки при сдвиге**

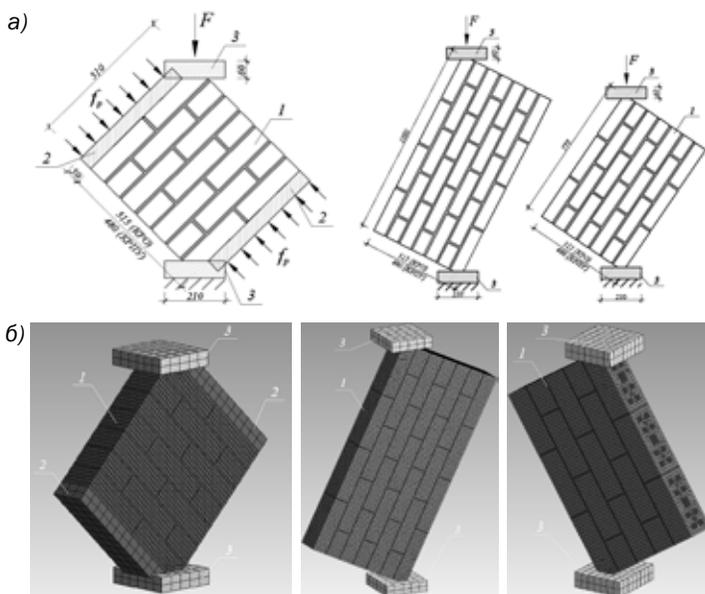
Вид кладочного элемента	Прочность кладочного раствора при сжатии $f_m$ (МПа)	Разрушающее напряжение сдвига $f_{vv}$ (МПа)	Модуль сдвига $G_{mv}$ (МПа)	Значения предельного угла сдвиговых деформаций $\gamma_{mv}$
Полнотелый керамический кирпич	10,9	0,77	3970	3,8E-04
	7,9	0,74	3350	3,4E-04
	3,1	0,38	2140	3,5E-04
Пустотелый керамический кирпич	10,9	0,66	2300	4,9E-04
	7,9	0,81	2370	4,2E-04
	3,1	0,52	1540	4,9E-04

Из таблицы 1 следует, что прочность кладочного раствора  $f_m$  существенно не отразилась на значениях предельных углов сдвиговых деформаций каменной кладки  $\gamma_{adm}$ , которые находились в диапазоне  $0,34 \dots 0,49 \cdot 10^{-3}$ . Что касается прочности при сдвиге  $f_{vv}$ , то при высокой прочности раствора  $f_m > 7.9$  МПа значения прочности при сдвиге  $f_{vv}$  значительно не менялись, а при уменьшении прочности раствора наблюдалось снижение прочности при сдвиге  $f_{vv}$ . Аналогичная закономерность наблюдалась и для получаемых значений модуля сдвига  $G_{mv}$ . Значения модуля сдвига, установленные при величине касательных напряжений  $\tau = 0,3 f_{vv}$ , составляют около 20% от модуля упругости каменной кладки [19].

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

При проведении численного эксперимента варьировались соотношения размеров сторон опытных образцов, а также уровни обжатия кладки при действии сдвигающего усилия перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов (диагональном сжатии). В ходе численного эксперимента методом конечных элементов (МКЭ) решались нелинейные контактные задачи с учетом трения и сцепления между кирпичом и раствором швом. Численная модель каменной кладки создавалась методом микро-моделирования [20].

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 (см. рисунок 5).



1 – образец кладки; 2 – пластины для передачи обжатия; 3 – опорные плиты

**Рисунок 5.** КЭ-модели образцов кладки при диагональном сжатии:  
а) – расчетные схемы; б) – КЭ-модели образцов кладки

В КЭ моделях были реализованы следующие виды контактного взаимодействия между соседними элементами:

- область между поверхностями кладочных элементов и поверхностями горизонтальных и вертикальных растворных швов – контактная модель трения «frictional» с соответствующими значениями коэффициента внутреннего трения и начальной прочности при сдвиге;
- область между поверхностью вертикального растворного шва и поверхностью горизонтального растворного шва – контактная модель трения «frictional» с соответствующими значениями коэффициента внутреннего трения;
- область между поверхностью кладочного элемента и поверхностью опорных и передаточной пластин – контактная модель трения «frictional» с соответствующими значениями коэффициента внутреннего трения;
- область между поверхностями кладочных элементов/растворных швов и поверхностью обжимной пластины – контактная модель «no separation», при которой не допускается разделение контактной и ответной частей с возможностью небольшого проскальзывания контактной поверхности.

Для оптимизации процесса решения нагрузка прикладывалась к модели образца в два этапа-шага. При расчете конечно-элементной модели образца при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов нагружение на первом шаге соответствовало приложению усилия обжатия, а на втором шаге – приложению усилия вдоль диагонали. В то же время при расчете модели образца без обжатия нагружение производилось за один шаг. Каждый шаг нагружения был разбит на 50–80 подшагов с целью приложения нагрузки непрерывно и равномерно ввиду нелинейного характера работы модели. При достижении несходимости в опциях решателя допускалось автоматическое добавление новых подшагов с дроблением последнего подшага, на котором было достигнуто успешное решение.

При моделировании был использован прямой тип решателя с добавлением фиктивных пружин малой жесткости для исключения случая внезапного хрупкого разрушения. Аналогично исследованиям Г. Г. Кашеваровой [20], нелинейный расчет выполнялся

с использованием метода Ньютона-Рафсона с несимметричной схемой хранения матриц жесткости. Критерий сходимости определялся погрешностью усилия – не более 5%.

Для того, чтобы установить, насколько достоверно расчетная модель каменной кладки отражает ее поведение при диагональном сжатии, было выполнено сравнение результатов экспериментальных исследований с результатами численного расчета. При этом сравнивались экспериментальные и установленные расчетом диаграммы деформирования образцов каменной кладки, значения прочности кладки при сдвиге, а также картины ее трещинообразования и разрушения.

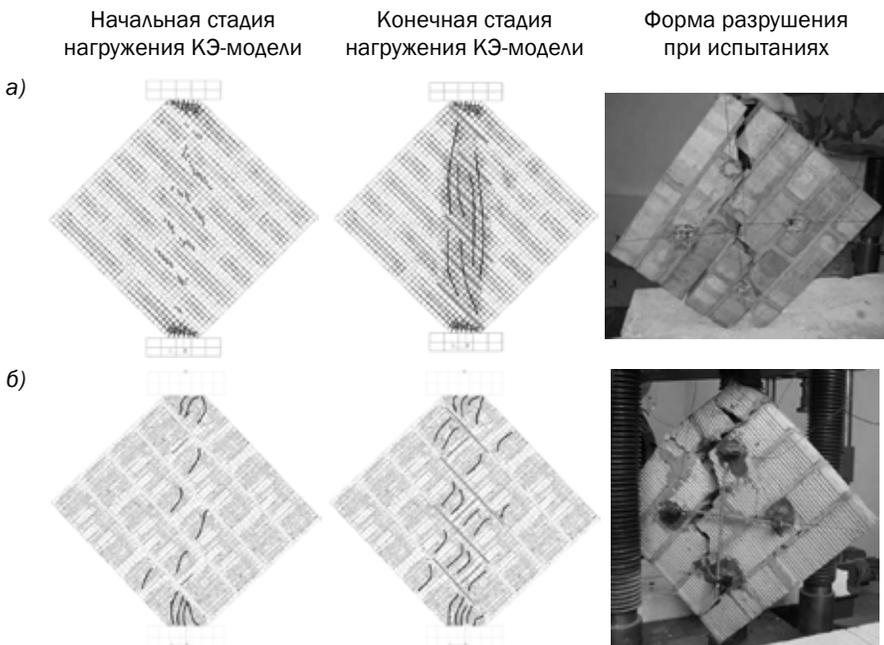
В таблице 2 приведено сопоставление опытных и теоретических значений прочности кладки при сдвиге перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов и значений предельных сдвиговых деформаций.

Таблица 2

**Сопоставление опытных и теоретических значений прочности кладки при сдвиге  $f_{sv}$  и предельных сдвиговых деформаций**

Вид кладочного элемента (марка раствора)	Значения прочности при сдвиге $f_{sv}$		Отклонения %	Значения предельных деформаций при сдвиге $\gamma$		Отклонения %
	Опытные $f_{sv,obs}$ (МПа)	Теоретические $f_{sv,cal}$ (МПа)		Опытные $\gamma$	Теоретические $\gamma$	
КРО-109	0,77	0,72	-6	3,8E-04	3,0E-04	-23
КРО-79	0,74	0,62	-17	3,4E-04	3,3E-04	-2
КРО-31	0,38	0,43	12	3,5E-04	3,5E-04	-1
КРПУ-109	0,66	0,84	28	4,9E-04	4,9E-04	-3
КРПУ-79	0,81	0,65	-20	4,2E-04	4,2E-04	24
КРПУ-31	0,52	0,54	5	4,9E-04	4,9E-04	18

На рисунке 6 показаны результаты численного моделирования трещинообразования и разрушения опытных образцов кладки. Первые трещины в КЭ-модели возникали в зонах растворных швов. В кладочных элементах образование трещин имело место лишь в финальной стадии нагружения.

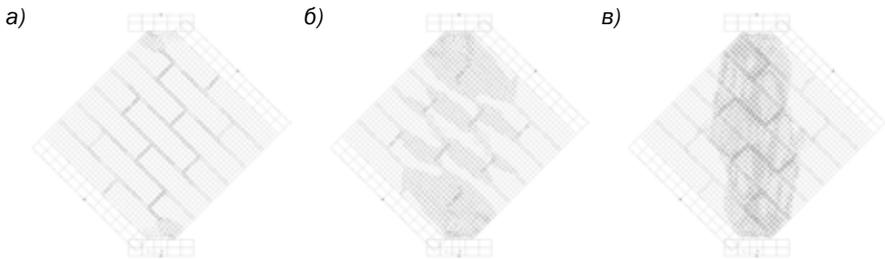


**Рисунок 6.** Характер трещинообразования в КЭ-моделях и опытных образцах кладки: а) – полнотельные кирпичи; б) – пустотельные кирпичи

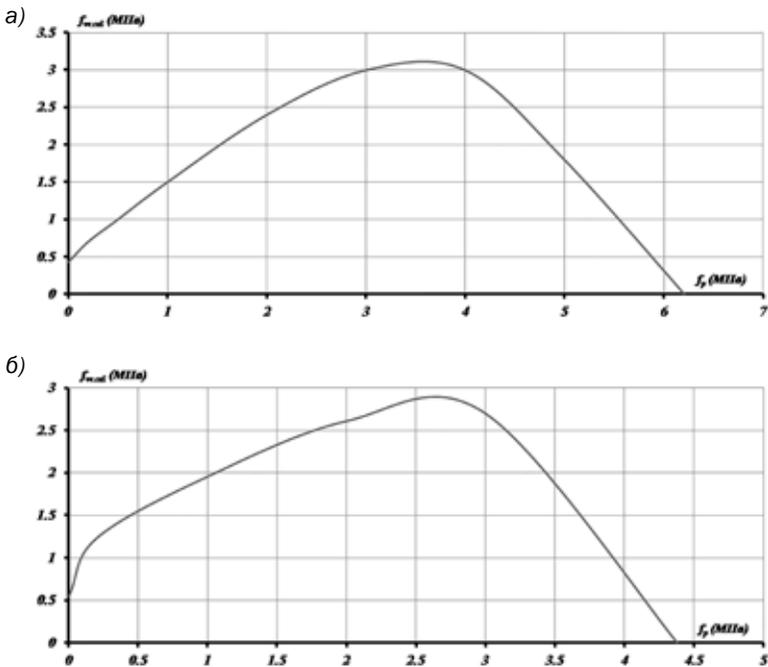
Сопоставление результатов физических экспериментов с результатами численного моделирования свидетельствует об адекватности принятой расчетной модели и ее применимости для оценки прочностных и деформационных характеристик каменной кладки при одновременном действии сдвигающих и сжимающих усилий, а также при изменении размеров сторон опытных образцов.

При одновременном приложении сжимающей нагрузки к образцам кладки при сдвиге наблюдались характерные случаи разрушения каменной кладки, представленные на рисунке 7.

На рисунке 8 представлены характерные диаграммы зависимости прочности образцов кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов  $f_{v,cal}$  от уровня предварительного обжатия  $f_p$  при прочности раствора  $f_m = 3,1$  МПа.



**Рисунок 7.** Характерные случаи разрушения расчетных моделей каменной кладки: а) потеря прочности касательного сцепления, б) образование трещин в кладочных элементах и растворных швах в результате действия главных растягивающих напряжений, в) разрушение кладки вследствие действия главных сжимающих напряжений



**Рисунок 8.** Графики зависимости прочности при сдвиге поперек горизонтальных швов  $f_{v,cal}$  от уровня предварительного обжатия  $f_p$ : а) – для моделей образцов из полнотелых керамических кладочных элементов КРО при прочности раствора  $f_m = 3,1$  МПа; б) – для моделей образцов из пустотелых керамических кладочных элементов КРПУ при прочности раствора  $f_m = 3,1$  МПа

Анализ полученных результатов показал, что зависимость расчетных напряжений сдвига от уровня предварительного обжатия в большей степени соответствует закону Манна-Мюллера, предполагающему изменение характера разрушения образца в зависимости от уровня сжимающих напряжений аналогично случаю сдвига кладки вдоль горизонтальных растворных швов [21, 22]. Следует также отметить, что зависимость предельных деформаций при сдвиге от уровня сжимающих напряжений имеет схожий характер, в то время как модуль сдвига изменяется незначительно.

В ходе численного эксперимента с варьированием геометрии образцов рассматривались модели образцов каменной кладки с соотношением ширины  $w$  к высоте  $h$  образцов, равным 1, 1,5 и 2.

В таблице 3 приведены теоретические значения прочности кладки при сдвиге перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов с соотношением ширины  $w$  к высоте  $h$  образцов, равным 1, 1,5 и 2, а в таблице 4 – значения модуля сдвига и предельных углов сдвиговых деформаций.

Таблица 3

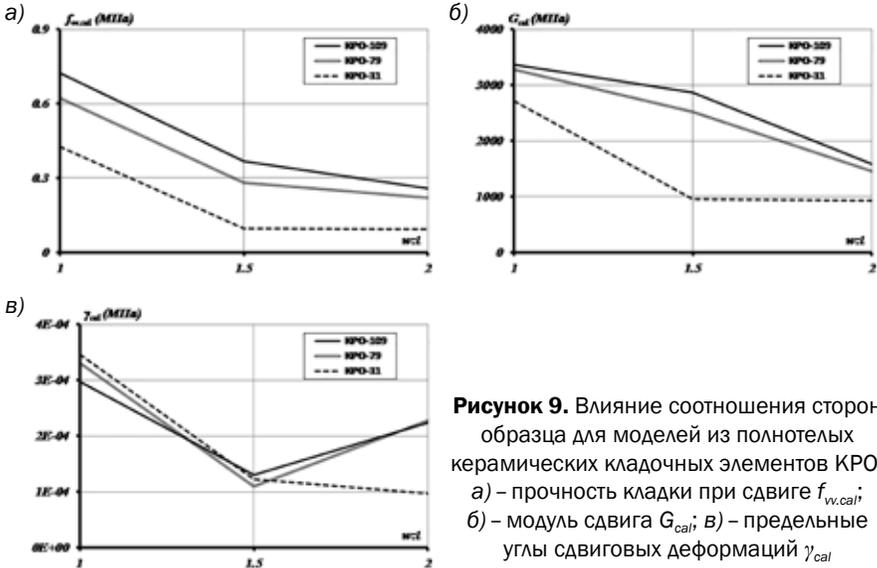
**Результаты численных расчетов прочности кладки при сдвиге  $f_w$  при разном соотношении сторон опытных образцов**

Вид кладочного элемента	Прочность при сдвиге $f_{w,cal}$ (МПа)		
	$w:l=1:1$	$w:l=1,5:1$	$w:l=2:1$
КРО-109	0,72	0,37	0,26
КРО-79	0,62	0,28	0,22
КРО-31	0,43	0,10	0,09
КРПУ-109	0,84	0,39	0,30
КРПУ-79	0,65	0,22	0,24
КРПУ-31	0,54	0,11	0,10

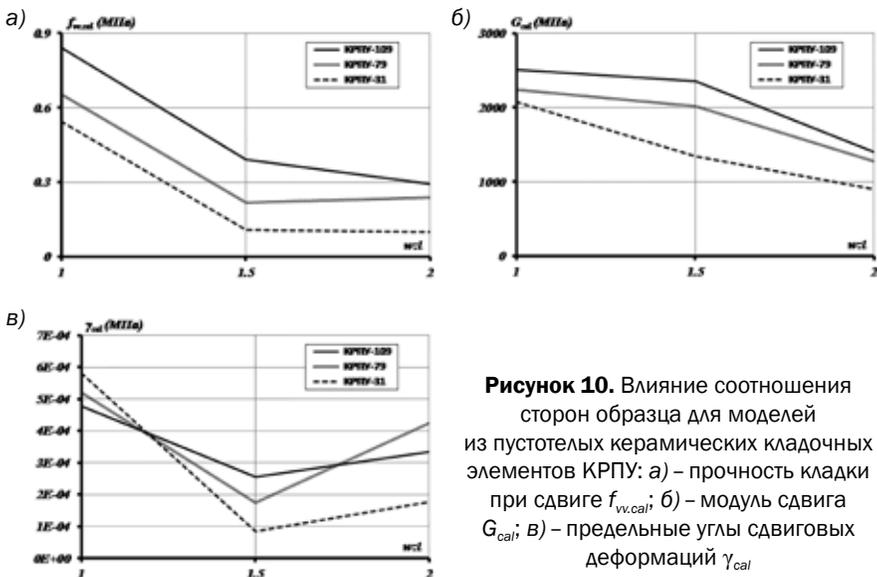
**Результаты численных расчетов модуля сдвига  $G_{cal}$  кладки и значений предельного угла сдвиговых деформаций  $\gamma_{cal}$**

Вид кладочного элемента	Модуль сдвига $G_{cal}$			Значения предельного угла сдвиговых деформаций $\gamma_{cal}$		
	$w:l=1:1$	$w:l=1,5:1$	$w:l=2:1$	$w:l=1:1$	$w:l=1,5:1$	$w:l=2:1$
1	2	3	4	5	6	7
КРО-109	3370	2870	1590	2,97E-04	1,30E-04	2,24E-04
КРО-79	3280	2530	1460	3,31E-04	1,10E-04	2,27E-04
КРО-31	2710	955	930	3,45E-04	1,23E-04	9,74E-05
КРПУ-109	2510	2355	1400	4,79E-04	2,56E-04	3,33E-04
КРПУ-79	2240	2015	1275	5,21E-04	1,76E-04	4,25E-04
КРПУ-31	2080	1350	905	5,80E-04	8,59E-05	1,76E-04

На рисунке 9 представлена графическая интерпретация полученных результатов для моделей образцов из полнотелых керамических кладочных элементов КРО.



На рисунке 10 представлена графическая интерпретация полученных результатов для моделей образцов из пустотелых керамических кладочных элементов КРПУ.



**Рисунок 10.** Влияние соотношения сторон образца для моделей из пустотелых керамических кладочных элементов КРПУ: а) – прочность кладки при сдвиге  $f_{v,cal}$ ; б) – модуль сдвига  $G_{cal}$ ; в) – предельные углы сдвиговых деформаций  $\gamma_{cal}$

Анализируя полученные графики, стоит отметить, что прочность кладки при сдвиге  $f_{v,cal}$  значительно снижается при изменении соотношения сторон образца, причем при  $w:l=1,5:1$  прочность при сдвиге практически равна прочности при  $w:l=2:1$ .

Что касается получаемых значений модуля сдвига, то более значительное падение происходит при соотношении  $w:l \geq 1,5$ , за исключением случая использования раствора малой прочности. При  $f_m=3,1$  МПа значительное снижение модуля сдвига наблюдается уже при  $w:l=1,5:1$ .

Минимальные значения предельных углов сдвиговых деформаций  $\gamma_{cal}$  были отмечены при  $w:l=1,5:1$ , максимальные – при  $w:l=1:1$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании выполненных экспериментально-теоретических исследований можно заключить следующее:

1. Прочность кладочного раствора  $f_m$  не влияет на значения предельных углов сдвиговых деформаций  $\gamma_{adm}$ , которые для каменной кладки из керамического кирпича при соотношении сторон образца 1:1 находились в диапазоне  $0,34...0,49 \cdot 10^{-3}$ .
2. Прочность кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов  $f_{vv}$  существенно зависела от прочности кладочного раствора при  $f_m = 3,1-7,9$  МПа. При  $f_m > 7,9$  МПа прочность каменной кладки  $f_{vv}$  не изменялась. Аналогичная закономерность наблюдалась и для значений модуля сдвига  $G_{mv}$ .
3. Прочность каменной кладки при сдвиге  $f_{vv,cal}$  и предельные значения угла сдвиговых деформаций
4. При уровнях обжата каменной кладки  $f_p \geq 0,4...0,6f$  имеет место резкое падение значения прочности каменной кладки при сдвиге  $f_{vv}$ .

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ 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. – 128 с.
2. Каменные и армокаменные конструкции: СНиП II-B.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. Int. 11.07.2007.

6. Kubica, J. (2003): Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi przemieszczeniami podłoża. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 196 s.
7. Кабанцев, О. В. Пластическое деформирование и разрушение каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев // Вестник МГСУ. – 2016. – №2. – С. 34-48.
8. Поляков, С. В. Прочность и деформации квадратных виброкирпичных панелей при перекосе в плоскости стены. Прочность вертикальных стыков / С. В. Поляков, В. И. Коноводченко. – М.: Госстройиздат, 1962. – С. 149-165.
9. Коноводченко, В. И. Прочность и деформации при центральном сжатии панелей из кладки с косым расположением кирпича / В. И. Коноводченко // Сейсмостойкость сборных крупноэлементных зданий. – М.: Госстройиздат, 1963. – С. 119-130.
10. 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.
11. Szarliński, J., Winnicki, A., Podleś, K.: Konstrukcje z betonu w płaskich stanach. Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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. Вып. 4. – ЦНИИСК. М.: Издательство литературы по строительству, 1968. – С. 4-24.
  16. Измайлов, Ю. В. Сейсмостойкость каркасно-каменных зданий / Ю. В. Измайлов. – Кишинев: Картя Молдовеняскэ, 1975. – 309 с.
  17. Schubprüfung an geschoßhohen Mauerwerksprüfkörpern. Deutsches Institut für Bautechnik DIBt, Sachverständigenausschuß «Wandbauelemente», 1997.
  18. Rossbach M., Schmidt U., Schubert P. Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit von Ziegelmauerwerk [Investigations on the shear resistance of brick masonry]. Mauerwerk. 2004. No. 8. pp.72–81.
  19. Деркач, В. Н. Исследование модуля упругости каменной кладки из керамических и силикатных кладочных элементов. / В. Н. Деркач, А. В. Галалюк // Вестник Полоцкого государственного университета. Строительство. Прикладные науки. – 2010. – № 12. – С. 77-81.
  20. Кашеварова, Г. Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки / Г. Г. Кашеварова, А. Ю. Зобачева // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 106-116.
  21. Демчук, И. Е. Предельные значения прочности каменной кладки при сдвиге в Национальном приложении к Еврокоду 6 / И. Е. Демчук // Актуальные проблемы инновационной подготовки инженерных кадров при переходе строительной отрасли на европейские стандарты. Сборник Международных научно-технических статей (материалы научно-метод. конф.), г. Минск, 26-27 мая 2015 г. / БНТУ; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск: БНТУ, 2015. – С. 77-89.

22. Демчук, И. Е. Экспериментально-теоретические исследования каменной кладки при сдвиге с обжатием / И. Е. Демчук // Вестник БрГТУ. – 2016. – № 1(97): Строительство и архитектура. – С. 112–116.

## REFERENCES

1. Evrokod 6. *Proektirovanie kamennykh konstruksiy. Chast 1-1: Obschie pravila dlya armirovannykh i nearmirovannykh konstruksiy* [Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures]: STB EN 1996-1-1-2008. Vved.1.07.2009. Minsk: Gosstandart, 2009. 128 p.
2. *Kamennyye i armokamennyye konstruksii* [Masonry and reinforced masonry structures]: SNiP II-V.2-71. Vved. 01.07.1972. M: TsNIISK im. V.A. Kucherenko Gosstroya SSSR: Stroyizdat, 1972. 30 p.
3. *Kamennyye i armokamennyye konstruksii: SNiP II-22-81\** (s izm. #1 i #2) [Masonry and reinforced masonry structures]. Vved. 01.01.1983. M: TsNIISK im. V.A. Kucherenko Gosstroya SSSR: FGUP TsPP, 2004. 40 p.
4. BS 5628. Part 1. *Structural use of unreinforced masonry*. BSI, London, 1992.
5. PN-B-03002:2007. *Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie* [Unreinforced masonry structures. Design and calculation]. Int. 11.07.2007.
6. Kubica J. *Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi przemieszczeniami podłoża* [Unreinforced masonry walls subjected to deformation caused by uneven displacements of the substrate]. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2003. 196 p.
7. Kabantsev O. V. *Plasticheskoe deformirovanie i razrushenie kamennoy kladki v usloviyah dvuhosnogo napryazhennogo sostoyaniya* [Plastic deformation and destruction of masonry in a biaxial stress state]. *Vestnik MGSU*. 2016 . No. 2. pp. 34-48.
8. Polyakov S. V., Konovodchenko V. I. *Prochnost i deformatsii kvadratnykh vibrokirpichnykh paneley pri perekose v ploskosti*

- stenyi. Prochnost vertikalnyih styikov* [Strength and deformation of square vibro-brick panels when skewing in the plane of the wall. Strength of vertical joints] Moscow: Gosstroyizdat, 1962. pp. 149-165.
9. Konovodchenko V. I. Prochnost i deformatsii pri tsentralnom szhatii paneley iz kladki s kosyym raspolozheniem kirpicha [Strength and deformation in the central compression of masonry panels with an oblique arrangement of bricks]. In: *Seysmostoykost sbornyih krupnoelementnyih zdaniy* [Seismic resistance of prefabricated large-element buildings]. M.: Gosstroyizdat, 1963. pp. 119-130.
  10. Jasiński R., Piekarczyk A., Kubica J. *Badania początkowej wytrzymałości muru na ścinanie wg zaleceń RILEM LUMB 6* [Initial shear wall strength tests according to RILEM LUMB 6 recommendations]. XLVII Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB. Opole – Krynica [XLVII Scientific Conference of the Committee of Civil Engineering and Water Management PAN PZITB Scientific Committee. Opole - Krynica], 2001. part.3. pp. 353-360.
  11. Szarliński J., Winnick A., Podleś K. *Konstrukcje z betonu w płaskich stanach* [Concrete structures in flat states]. Politechnika Krakowska, Kraków 2002.
  12. 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* [Extending the scientific basis of Eurocode findings 6 “designing masonry structures. Scientific and research commentary to PN-EN 1996-1-1: 2008, PN-EN 1996-2: 2008 and PN-EN 1996-3: 2008]. Wydawnictwo ITB. Warszawa 2008.
  13. 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.
  14. American Society for Testing and Materials (ASTM). 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.
15. Shishkin A. A. *Prichiny poyavleniya treschin v kamennyih i blochnyih zdaniyah povyishennoy etazhnosti s nesuschimi poperechnymi stenami i metody ih ustraneniya* [Causes of the appearance of cracks in masonry and block buildings of high storeys with bearing transverse walls and methods for their elimination]. In: Analiz prichin avariyn stroitelnykh konstrukt-siy. Vyipusk 4 [Analysis of the causes of accidents of building structures. Issue 4]. Moscow: Izdatelstvo literatury po stroitel-stvu, 1968. pp. 4-24.
  16. Izmaylov Yu. V. *Seysmostoykost karkasno-kamennykh zdaniy* [Seismic resistance of frame-stone buildings]. Kishinev: Kartya Moldovenyashke, 1975. 309 p.
  17. Schubprüfung an geschoßhohen Mauerwerksprüfkörpern [Shear test on storey-high masonry test bodies]. Deutsches Institut für Bautechnik DIBt, Sachverständigenausschuß «Wandbauelemente», 1997.
  18. Rossbach M., Schmidt U., Schubert P. Untersuchungen zur Schubtragfähigkeit von Ziegelmauerwerk [Investigations on the shear resistance of brick masonry]. *Mauerwerk*. 2004. No. 8. pp.72–81.
  19. Derkach V.N., Galalyuk A. V. Issledovanie modulya uprugosti kamennoy kladki iz keramicheskikh i silikatnykh kladochnykh elementov [Investigation of the modulus of elasticity of masonry from ceramic and silicate masonry elements]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Stroitelstvo. Prikladnyye nauki*. 2010. No. 12. pp.77-81.
  20. Kashevarova G. G., Zobacheva A. Yu. Modelirovanie protses-sa razrusheniya kirpichnoy kladki [Modeling the process of destruction of brickwork]. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politehnicheskogo universiteta. Stroitelstvo i arhitektura*. 2010. No. 1. pp. 106-116.
  21. Demchuk, I. E. *Predelnyye znacheniya prochnosti kamennoy kladki pri sdvige v Natsionalnom prilozhenii k Evrokodu 6* [Limit values for the strength of masonry under shear in the National Annex to Eurocode 6]. In: Aktualnyye problemy

innovatsionnoy podgotovki inzhenernykh kadrov pri perehode stroitelnoy otrasli na evropeyskie standarty. Sbornik Mezhdunarodnykh nauchno-tehnicheskikh statey [Actual problems of innovative training of engineering personnel in the transition of the construction industry to European standards. Collection of International Scientific and Technical Articles] (materialy nauchno-metod. konf.), Minsk, 26-27 maya 2015. Minsk: BNTU, 2015. pp.77-89.

22. Demchuk I. E. Eksperimentalno-teoreticheskie issledovaniya kamennoy kladki pri sdvige s obzhatiem [Experimental-theoretical studies of masonry under shearing with compression]. *Vestnik BrGTU*. 2016. No. 1(97): Stroitelstvo i arhitektura [Construction and architecture]. pp. 112–116.

*Статья поступила в редколлегию 01.12.2017.*