

Результаты экспериментальных исследований устойчивости формы стержневых многогранников позволили установить, что предложенная математическая модель расчёта потери местной устойчивости формы сетчатого купола с жёсткими узлами при действии узловых осесимметричных нагрузок обладает удовлетворительной точностью. Расхождение между величинами нагрузок, полученных расчётным путём и в ходе эксперимента, не превысило 17%. Наибольшие значения расхождений между экспериментальными и расчётными значениями внутренних усилий, как правило, соответствуют начальной стадии нагружения и малым значениям внутренних усилий.

#### Список цитированных источников

1. Lopez, A. Numerical model and experimental tests on single-layer latticed domes with semi-rigid joints / A. Lopez, I. Puente, M. A. Serna // Computers and Structures. – № 85 (2007). – P. 360–374.
2. Патент на п. м. РБ № 10764, МПК E 04B 1/58, 2015.
3. Патент на п. м. РБ № 11204, МПК E 04B 1/58, 2016.
4. Коршун, Л. И. Основы устойчивости стержневых систем / Л. И. Коршун, В. И. Игнатьев, А. С. Хамутовский. – Брест, 1995. – 64 с.
5. Пиковский, А. Ф. Статика стержневых систем со сжатыми элементами / А. А. Пиковский. – Москва : ФИЗМАТГИЗ, 1961. – 396 с.
6. Корноухов, Н. В. Прочность и устойчивость стержневых систем / Н. В. Корноухов. – Москва : Стройиздат, 1949. – 376 с.

УДК 69.022

## ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СДВИГЕ ПОПЕРЕК ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ РАСТВОРНЫХ ШВОВ

Демчук И. Е.

**Annotation:** *Experimental and numerical studies of shear strength perpendicular to the plane of horizontal mortar joints of masonry from ceramic elements were carried out. Based on experimental results the value of the masonry initial shear strength perpendicular to the horizontal mortar joints is not less than 1,5 times higher than in shear parallel to the horizontal mortar joints were identified. Based on numerical calculations, diagrams of the dependence of the strength, values of the shear modulus, values of the limiting angle of shear deformations in shear of masonry across horizontal mortar joints from the level of compression of masonry were obtained. Analytical dependences to calculate the masonry shear strength perpendicular to the plane of the horizontal mortar joints taking into account its compression, as well as the ultimate value of the masonry shear strength were obtained.*

**Аннотация:** *Выполнены экспериментальные и численные исследования прочности при сдвиге перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов кладки, выполненной из керамических кладочных элементов. На основании результатов экспериментальных исследований доказано, что значения начальной прочности каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов не менее, чем в 1,5 раза выше, чем при сдвиге вдоль горизонтальных растворных швов. На основании численных расчетов выявлены зависимости прочности, значений модуля сдвига, значений предельного угла сдвиговых деформаций при сдвиге каменной кладки поперек горизонтальных швов от уровня обжатия каменной кладки. Получены аналитические зависимости для расчета прочности при сдвиге перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов каменной кладки с учетом ее обжатия, а также предельного значения прочности при сдвиге каменной кладки.*

**Введение.** Сдвиг каменной кладки в направлении, перпендикулярном горизонтальным швам, до настоящего времени изучен недостаточно. В ТКП EN 1996-1-1 [1] значения прочности при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов каменной кладки отсутствуют, а в СНиП II-22 [2] приведены числовые значения, зависящие только от прочности на срез кладочных элементов. Такой же подход используется в британских [3] и польских [4] нормах. Однако экспериментальные исследования показывают, что основное влияние на прочность каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов оказывает не только прочность на срез камня, но и прочность кладочных растворов, а также уровень обжатия каменной кладки [5, 6]. В нормативных документах также отсутствуют данные о влиянии уровня обжатия каменной кладки на ее прочность при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов. Исследования также показали, что модуль сдвига каменной кладки не является величиной постоянной и снижается с ростом уровня касательных напряжений. В ТКП EN 1996-1-1 [1] и СНиП II-22 [2] значение модуля сдвига принимается равным 40% от кратковременного модуля упругости каменной кладки, что может приводить к ошибочным результатам при проверке предельных состояний каменных конструкций, подверженных сдвигу. Также было выявлено, что проверку предельных состояний каменных стен при действии сдвигающих усилий в их плоскости удобно выполнять на базе деформационного критерия прочности каменной кладки при сдвиге – предельного угла сдвиговых деформаций  $\gamma_{adm}$ . Однако решение данной задачи осложняется отсутствием в нормах числовых значений  $\gamma_{adm}$ .

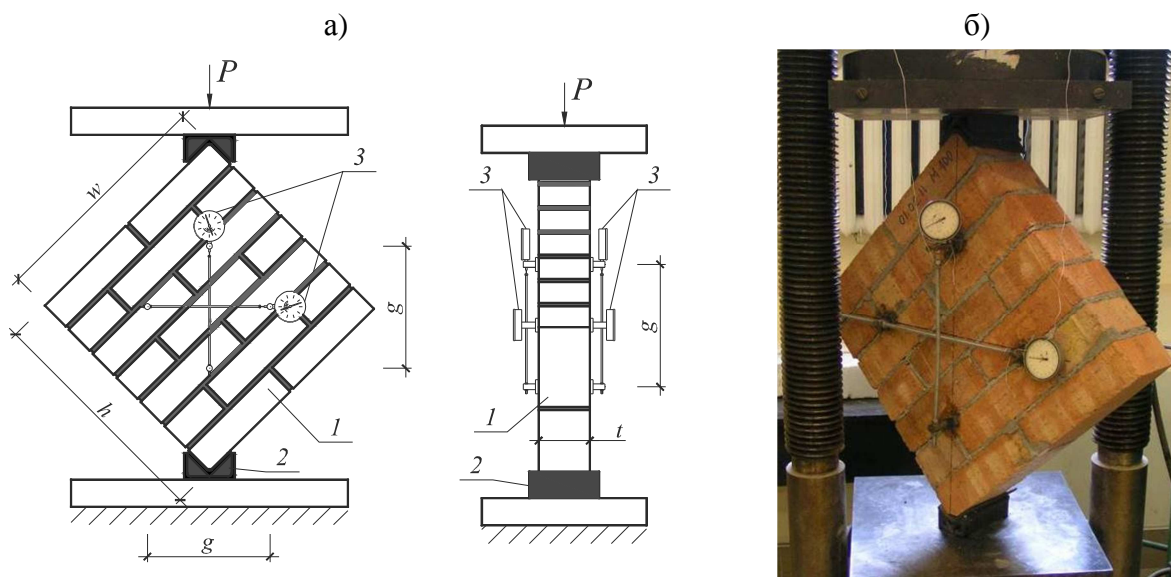
Все это свидетельствует о необходимости уточнения перечисленных характеристик путем проведения экспериментальных исследований. Однако создать в образцах каменной кладки одновременное обжатие и сдвиг поперек горизонтальных швов достаточно сложно. В этой связи задачу оценки прочности кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов с учетом ее обжатия целесообразно решать с применением численного моделирования процесса деформирования и разрушения каменной кладки при сдвиге [7].

В настоящем исследовании описаны экспериментальные исследования образцов каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов без обжатия, получены исходные характеристики материалов кирпича и раствора для использования в математических моделях в пакете Ansys, проведено тестирование конечно-элементных моделей на результатах опытных испытаний, а также произведены расчеты КЭ-моделей образцов каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов с обжатием.

**Экспериментальные исследования.** Испытания выполнялись на образцах каменной кладки, имеющих близкую к квадрату форму (с размером сторон около 500 мм) (см. рисунок 1). В этом случае в кладке возникает напряженное состояние, приближенное к случаю сдвига поперек горизонтальных швов, когда образуется трещина по диагонали образца. Для изготовления образцов использовались полнотелые и пустотелые (объем пустот 18%) кирпичи производства ОАО "Брестский КСМ" (РБ) на стандартных растворах разной прочности при сжатии 3,1, 7,9 и 10,9 МПа.

На основании испытаний определялись: прочность при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов  $f_{vvo}$  кладки при нулевых уровнях обжатия, значения предельного угла сдвиговых деформаций  $\gamma$  и модуля сдвига  $G$  (таблица 1).

В таблице 1 также указаны значения прочности при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов  $f_{vo}$  кладки при нулевых уровнях обжатия на основании собственных исследований образцов на этих же материалах [8].



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 1 – Испытание образца при диагональном сжатии**

Таблица 1 – Результаты испытаний образцов кладки из полнотелого кирпича КРО и пустотелого кирпича КРПУ на сдвиг поперек горизонтальных растворных швов

Вид кирпича	Прочность при сжатии кладочного раствора $f_m$ (МПа)	Прочность при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов каменной кладки $f_{vvo.obs}$ (МПа)	Прочность при сдвиге вдоль горизонтальных растворных швов каменной кладки $f_{vo.obs}$ (МПа)	Модуль сдвига каменной кладки $G_{obs}$ (МПа)	Предельный угол сдвиговых деформаций каменной кладки $\gamma_{obs}$ (мм/м)
КРО	10,9	0,77	0,50	2090	0,38
	7,9	0,74	0,41	2220	0,34
	3,1	0,38	0,23	1130	0,35
КРПУ	10,9	0,66	0,48	1470	0,49
	7,9	0,81	0,34	1980	0,42
	3,1	0,52	0,18	1100	0,49

Из таблицы 1 следует, что значения начальной прочности каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов не менее, чем в 1,5 раза выше, чем при сдвиге вдоль горизонтальных растворных швов. Особенно отчетливо это проявляется в каменных кладках, выполненных из пустотелых кладочных элементов. Это может говорить о том, что рекомендации ТКП EN 1996-1-1 [1] об уравнивании прочности кладки на сдвиг поперек и вдоль горизонтальных швов не являются обоснованными.

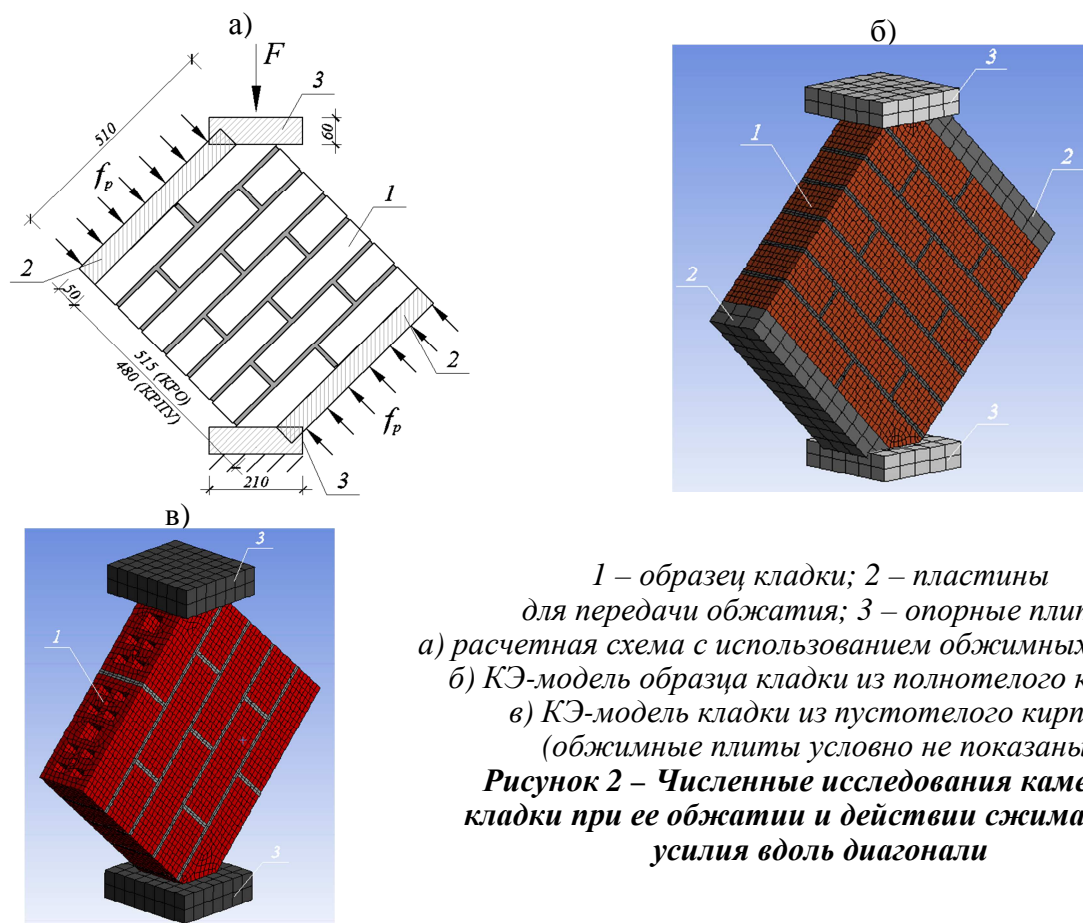
Из таблицы 1 следует, что изменение прочности раствора с 3,1 МПа до 10,9 МПа не отражается на значениях предельных углов сдвиговых деформаций

каменной кладки. Что касается значений модуля сдвига, то наиболее заметно падение значений при малой прочности при сжатии раствора (3,1 МПа).

**Численное моделирование.** КЭ-анализ проводился в среде Ansys Workbench, где рассматривалась объемная задача с использованием КЭ SOLID65, допускающего учет трещинообразования, и контактных КЭ CONTA174/TARGE170.

Что касается свойств материалов, то прочностные и деформационные характеристики кирпича и раствора для дальнейшего использования в качестве исходных данных для численных моделей были получены по результатам предварительно проведенных экспериментальных исследований [9].

Геометрические размеры образца были приняты 510x515(480)x120 мм при толщине растворного шва 10 мм. Для полного соответствия реальному эксперименту в КЭ-модели учитывалось также контактное взаимодействие опытного образца кладки с плитами пресса (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Численные исследования каменной кладки при ее обжатии и действии сжимающего усилия вдоль диагонали**

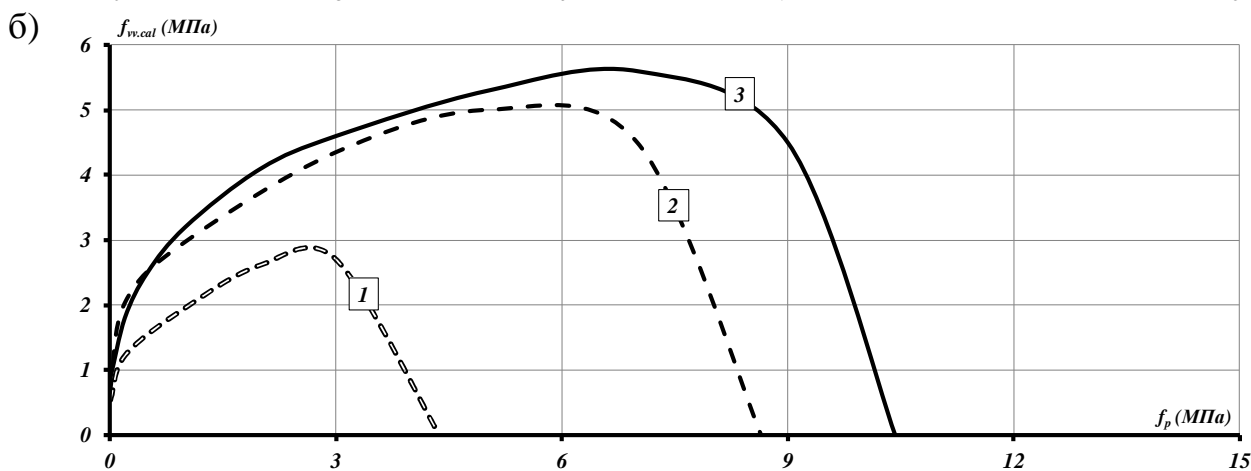
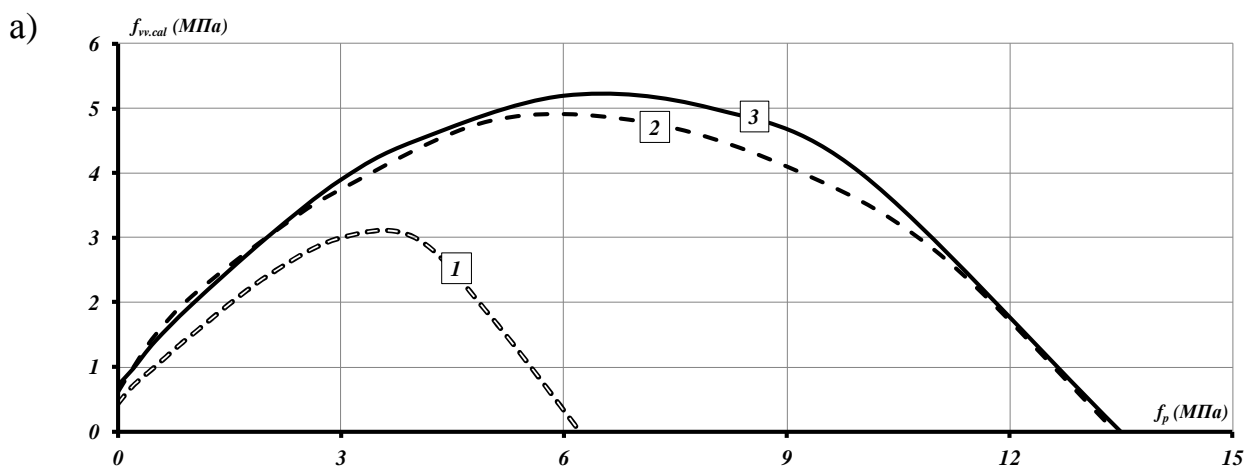
При расчете конечно-элементной модели образца при сдвиге поперек горизонтальных растворных швов нагружение передавалось в два этапа: на первом шаге – приложение усилия обжатия, а на втором шаге – приложение усилия вдоль диагонали. Каждый шаг нагружения был разбит на 50...80 подшагов с целью приложения 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.

Разница в значениях прочностных и деформационных характеристиках кладки при сдвиге без обжатия, полученных экспериментально и численным расчетом, составила до 25%, что можно считать удовлетворительным (таблица 2).

На представленных на рисунке 3 графиках показаны зависимости прочности кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов  $f_{vv.cal}$  от уровня ее обжатия  $f_p$ .

Таблица 2 – Сопоставление опытных значений начальной прочности при сдвиге кладки и предельного угла сдвиговых деформаций с результатами численного расчета

Вид кирпича	Прочность при сжатии кладочного раствора $f_m$ (МПа)	Значения прочности при сдвиге $f_{vvo}$ (МПа)		Отклонения %	Значения предельного угла сдвиговых деформаций $\gamma$ (мм/м)		Отклонения %
		Средние опытные значения $f_{vvo.obs.mv}$	Расчетные $f_{vvo.cal}$		Средние опытные значения $\gamma_{obs.mv}$	Расчетные $\gamma_{cal}$	
КРО	10,9	0,77	0,72	-6	0,38	0,30	-23
	7,9	0,74	0,62	-17	0,34	0,33	-2
	3,1	0,38	0,43	12	0,35	0,35	-1
КРПУ	10,9	0,66	0,84	28	0,49	0,48	-3
	7,9	0,81	0,65	-20	0,42	0,52	24
	3,1	0,52	0,54	5	0,49	0,58	18



«1» –  $f_m = 3,1$  МПа; «2» –  $f_m = 7,9$  МПа; «3» –  $f_m = 10,9$  МПа

а) полнотельный кирпич КРО; б) пустотельный кирпич КРПУ

**Рисунок 3 – Графики зависимости прочности каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов  $f_{vv.cal}$  от уровня предварительного обжатия  $f_p$**

Результаты численных исследований показывают, что при возрастании сжимающих напряжений в каменной кладке  $0,5 \cdot f$  (где  $f$  – прочность при сжатии каменной кладки) ее прочность при сдвиге поперек горизонтальных швов повышается. Дальнейший рост сжимающих напряжений приводит к резкому падению прочности при сдвиге каменной кладки. Это обусловлено изменением характера разрушения каменной кладки в зависимости от уровня сжимающих напряжений.

При одновременном действии сжимающих и сдвигающих напряжений каменная кладка работает в условиях плоского напряженного состояния. Рассматривая каменную кладку как однородный изотропный материал, главные растягивающие напряжения в кладке определяются по формуле:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[ \sigma_\alpha + \sqrt{\sigma_\alpha^2 + 4\tau_\alpha^2} \right], \quad (1)$$

где  $\sigma_1$  – главное растягивающее напряжение;

$\sigma_\alpha$  – нормальное напряжение;

$\tau_\alpha$  – касательное напряжение.

При испытаниях образцов каменной кладки на диагональное сжатие при нулевом уровне сжимающих напряжений начальные значения прочности кладки при сдвиге  $f_{vvo}$  равны значению ее прочности на растяжение при действии главных растягивающих напряжений под углом  $45^\circ$  к горизонтальным швам кладки. Следовательно, в предельном состоянии для каменной кладки  $\sigma_1 = f_{vvo}$ . Приняв  $\sigma_\alpha = f_p$ , а  $\tau_\alpha = f_{vv}$ , получим:

$$f_{vvo} = \frac{1}{2} \cdot \left[ f_p + \sqrt{f_p^2 + 4f_{vv}^2} \right], \quad (2)$$

где  $f_{vv}$  – прочность каменной кладки при сдвиге с учетом действия сжимающих напряжений;

$f_p$  – значение сжимающих напряжений;

$f_{vvo}$  – начальное значение прочности каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов.

Выражая значение  $f_{vv}$  из формулы (2), получим:

$$f_{vv} = f_{vvo} \cdot \sqrt{1 + \frac{f_p}{f_{vvo}}}. \quad (3)$$

Аппроксимирующую зависимость для определения прочности кладки при сдвиге в диапазоне сжимающих напряжений  $f_p = 0 \dots 0,5 \cdot f$  запишем:

$$f_{vv} = f_{vvo} \cdot \sqrt{1 + k \cdot \frac{f_p}{f_{vvo}}}, \quad (4)$$

где  $k$  – безразмерный поправочный коэффициент, значения которого принимаются равными  $k=6$  для каменных кладок из полнотелых кладочных элементов и  $k=7$  – для пустотелых кладочных элементов.

При этом значение  $f_{vv}$  не должно превышать предельного значения  $f_{vv,lt}$ , которое определяется по формуле:

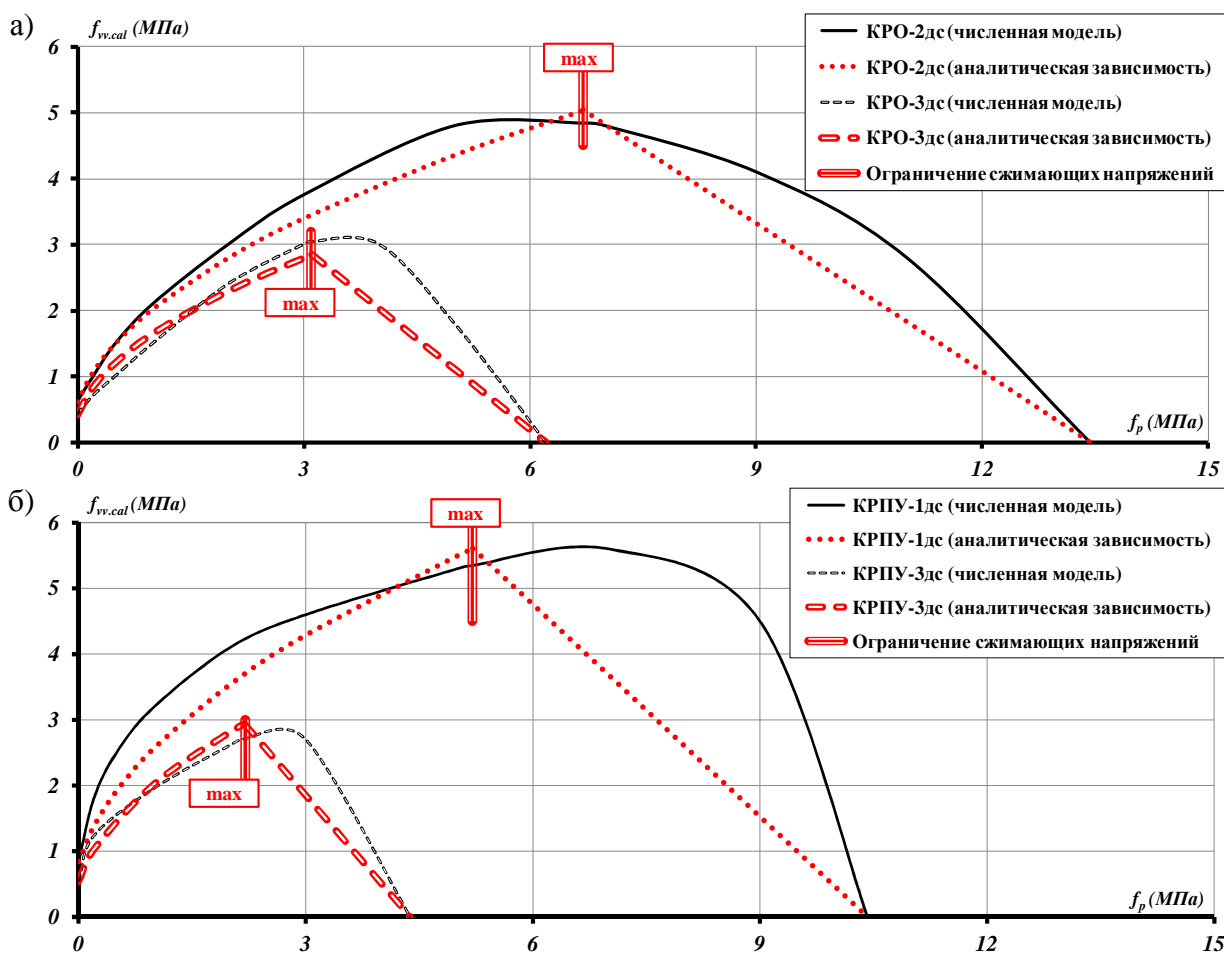
$$f_{vv,lt} = f_{vvo} \cdot \sqrt{1 + k \cdot \frac{0,5f}{f_{vvo}}}, \quad (5)$$

где  $f$  – прочность каменной кладки при сжатии.

Если сжимающие напряжения в каменной кладке превышают значение  $f_p = 0,5f$ , то прочность каменной кладки при сдвиге поперек горизонтальных швов устанавливается по формуле:

$$f_{vv} = (f - f_p) \cdot \frac{f_{vv,lt}}{0,5f}. \quad (6)$$

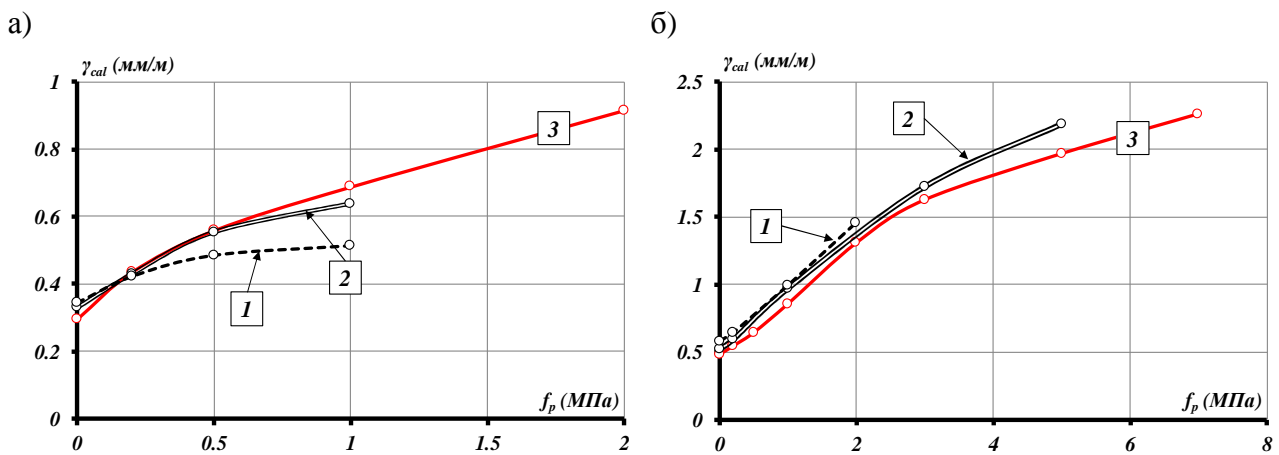
Графическая интерпретация зависимостей (4...6) в сопоставлении с графиками « $f_{vv}-f_p$ », полученными на основании численных исследований, приведена на рисунке 4.



а) полнотельный кирпич КРО; б) пустотельный кирпич КРПУ

**Рисунок 4 – Сравнение графиков зависимости прочности при сдвиге поперек горизонтальных швов каменной кладки  $f_{vv}$  от уровня предварительного обжатия  $f_p$  по результатам КЭ-моделирования с принятыми аналитическими зависимостями**

На рисунке 5 приведены графики зависимости значений предельного угла сдвиговых деформаций при сдвиге поперек горизонтальных швов  $\gamma_{cal}$  от уровня обжатия  $f_p$ .



«1» –  $f_m = 3,1$  МПа; «2» –  $f_m = 7,9$  МПа; «3» –  $f_m = 10,9$  МПа  
 а) полнотелый кирпич КРО; б) пустотелый кирпич КРПУ

**Рисунок 5 – Графики зависимости значений предельного угла сдвиговых деформаций при сдвиге поперек горизонтальных швов  $\gamma_{cal}$  от уровня предварительного обжатия  $f_p$**

Из рисунка 5 следует, что значения предельного угла сдвиговых деформаций при сдвиге поперек горизонтальных швов для полнотелых и пустотелых кладочных элементов возрастают при росте уровня сжимающих напряжений, независимо от прочности раствора. При этом значение модуля сдвига с увеличением уровня обжатия кладки существенно не изменялось. Поэтому при проверке предельного состояния несущей способности стен, подверженных одновременному действию сдвигающих и сжимающих усилий, целесообразно применять значения  $\gamma_{adm}$ , установленные при нулевом уровне обжатия, равные 0,35 мм/м. Условием выполнения требований предельного состояния несущей способности каменной стены является непревышение расчетными значениями углов сдвиговых деформаций величины  $\gamma_{adm}$ .

**Заключение.** Предложена численная модель каменной кладки, подверженной действию сдвигающей и сжимающей нагрузки, базирующаяся на решении МКЭ нелинейных контактных задач с трением и сцеплением между кладочными элементами и раствором на основе пакета ANSYS.

На основании численных расчетов выявлены зависимости прочности, значений модуля сдвига, значений предельного угла сдвиговых деформаций при сдвиге каменной кладки поперек горизонтальных швов от уровня обжатия каменной кладки.

Получены аналитические зависимости для расчета прочности при сдвиге перпендикулярно плоскости горизонтальных растворных швов каменной кладки с учетом ее обжатия, а также предельного значения прочности при сдвиге каменной кладки.

#### Список цитированных источников

1. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Часть 1-1. Общие правила для армированных и неармированных каменных конструкций: ТКП EN 1996-1-1-2016 (33020) (EN 1996-1-1:2005+A1:2012, IDT). – Взамен СТБ EN 1996-1-1-2008; – Введ. РБ 11.03.2016. – Минск : Минстройархитектуры Республики Беларусь: Стройтехнорм: Бизнесофсет, 2016. – 109 с.



2. Каменные и армокаменные конструкции: СНиП II-22-81\* (с изм. №1 и №2 ВУ). – Введ. 01.01.1983 (отменен на территории РБ с 01.01.2018). – Москва : ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко Госстроя СССР, 2015. – 46 с.

3. Structural use of unreinforced masonry: BS 5628-1:2005. Part 1. – Publ. 08.12.2005. – London : BSI, 1992. – 80 p.

4. Konstrukcje murowe niezbrojone. Projektowanie i obliczanie: PN-B-03002:2007. – Publ. 11.07.2007. – KT 252, Projektowania Konstrukcji Murowych, 2007. – 68 str.

5. Kubica, J. Niezbrojone ściany murowe poddane odkształceniom postaciowym wywołanym nierównomiernymi przemieszczeniami podłoża / J. Kubica. – Gliwice : Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003. – 196 s.

6. Кабанцев, О. В. Влияние уровня нормального сцепления на процесс пластического деформирования каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев, Э. С. Усеинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – Томск, 2015. – № 4. – С. 78–89.

7. Демчук, И. Е. Прочность и деформации каменной кладки из керамического кирпича при сдвиге поперек горизонтальных швов / И. Е. Демчук // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол. : О. Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2017. – Вып. 9. – принята к публикации.

8. 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.

9. Галалюк, А. В. Влияние прочности раствора при сжатии на величину модуля упругости раствора и коэффициент Пуассона / А. В. Галалюк // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: збірник наукових праць. – Рівне, 2012. – Випуск 24. – С. 100–112.

**УДК 624.15+614.8.084+519.95:330.115**

## **ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ВАРИАНТОВ ОПТИМИЗАЦИИ ФАКТОРОВ ПРОЦЕССА УПЛОТНЕНИЯ ГРУНТОВ МЕТОДАМИ ИНТЕНСИВНОГО УДАРНОГО УПЛОТНЕНИЯ**

*Клебанюк Д. Н., Пойта П. С., Шведовский П. В.*

**Аннотация:** В статье рассмотрены основные аспекты поиска и выбора оптимальных вариантов процесса уплотнения грунтовых оснований с позиции конструктивно-технологических, организационно-экологических факторов и с учетом инженерно-геологических условий территории.

Предложенная методика, базирующаяся на совокупности статистических методов и моделей, обеспечивает вероятность оптимального выбора факторов процесса уплотнения грунтов не менее  $P=0,92$ .

**Ключевые слова:** оптимизация, факторы процесса, уплотнение, грунты, методика.

*Илл. 1, табл. 2, библиогр. назв. 17.*

**Annotation:** In article the main aspects of search and choice of optimal variants of process of consolidation of the soil bases from a position of constructive and technological, organizational and ecological factors and taking into account engineering-geological conditions of the territory are considered.

The offered technique which is based on set of statistical methods and models provides probability of the optimum choice of factors of process of consolidation of soil not less than  $P = 0,92$ .

**Keywords:** optimization, process factors, compression, soils, methods.

*Ill. 1, tab. 2, bibl. nam. 17.*