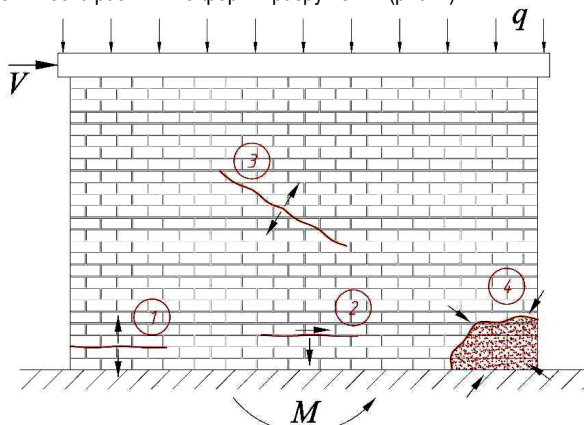


Демчук И.Е.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СДВИГЕ С ОБЖАТИЕМ

Введение. Прочность кладки на сдвиг имеет значение в стенах зданий, подверженных воздействию горизонтальных сил, возникающих от действия ветра, сейсмических нагрузок, деформаций основания и иных воздействий, связанных с возникновением дополнительного изгиба. В стенах, нагруженных в своей плоскости, в зависимости от прочностных параметров кладочных элементов и раствора, типа перевязки, а также результирующей внешних нагрузок, могут иметь место различные формы разрушения (рис. 1).



1 – нарушения нормального сцепления между раствором и кладочными элементами; 2 – нарушения касательного сцепления между раствором и кладочными элементами; 3 – превышения главными растягивающими напряжениями прочности кладки на растяжение; 4 – превышения сжимающими напряжениями прочности кладки на сжатие

Рис. 1. Формы разрушения каменной кладки

Теоретическое представление о работе каменной кладки при сдвиге дает теория Манна-Мюллера [1], в которой работа кладки рассматривается как несколько последовательных этапов (см. рис. 1 и 2). Стоит отметить, что данная теория впервые была применена в немецких нормах еще в 1984 году [2].

Согласно данной теории, разрушение кладки может происходить в результате:

- 1) нарушения нормального сцепления между раствором и кладочными элементами из-за поворота отдельных кладочных элементов (зона «А», прямая «1»);
- 2) нарушения касательного сцепления между раствором и кладочными элементами (зона «В», прямая «2»);
- 3) превышения главными растягивающими напряжениями прочности кладки на растяжение (зона «С», кривая «3»);
- 4) превышения сжимающими напряжениями прочности кладки на сжатие (зона «D», прямая «4»).

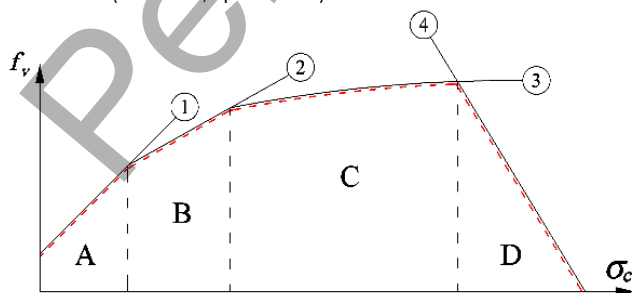


Рис. 2. Критерий Манна-Мюллера

Что касается отечественных норм, то в действующих на территории РБ СНиП II-22-81 [3] и СТБ EN 1996-1-1-2008 [4] реализованы более простые подходы, не учитывающие прочности кладки при сжатии.

В соответствии со СНиП II-22-81 [3], прочность каменной кладки по неперевязанному сечению определяется по закону Кулона-Мора и ассоциируется только со сдвигом кладки в плоскости горизонтальных растворных швов без каких-либо ограничений. Это значит, что теоретически прочность кладки при сдвиге никак не ограничена при росте сжимающих напряжений (см. рис. 3,а). В соответствии с СТБ EN 1996-1-1-2008 [4], дополнительно вводится ограничение прочности кладки при сдвиге значением, которое соответствует разрыву камня (область «В») (см. рис. 3,б).

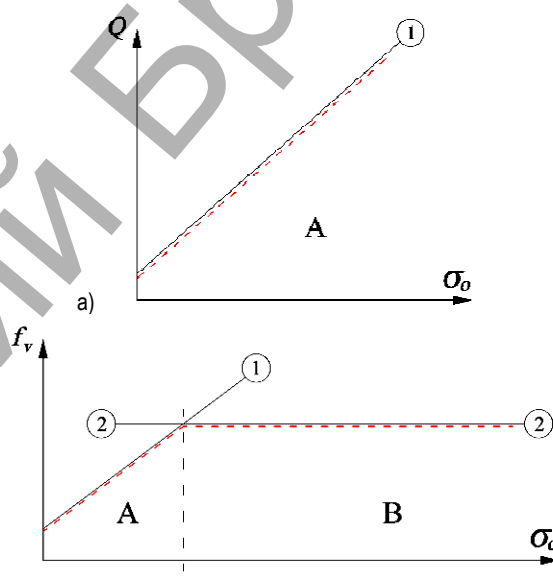


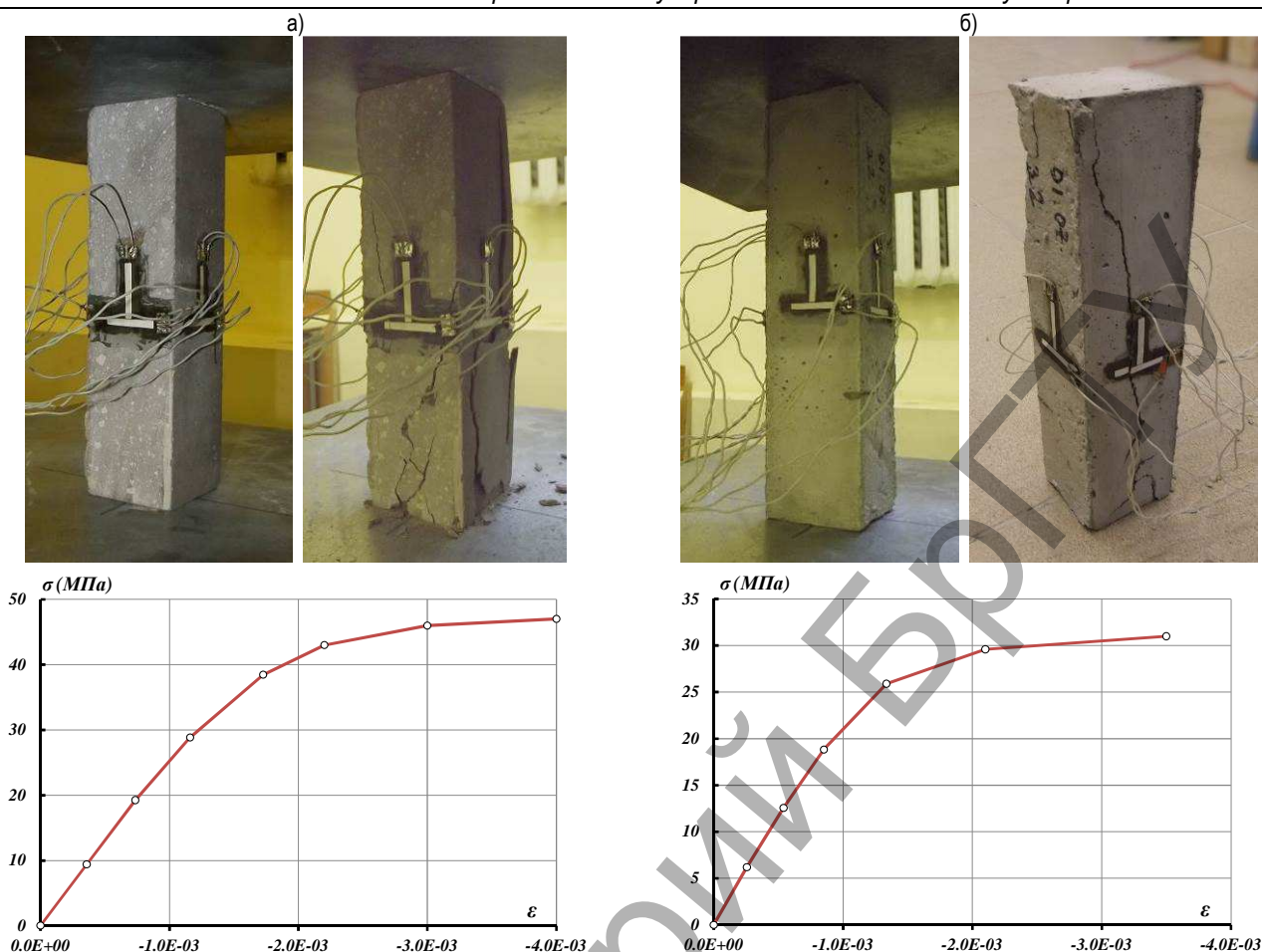
Рис. 3. Зависимость величины прочности на сдвиг кладки от уровня сжимающего усилия в соответствии с [3] и [4]

Требования по применению в конкретной стране предельного значения прочности при сдвиге устанавливаются в национальном приложении. В работе [5] была предложена методика по определению данных значений методом конечных элементов (МКЭ) на основе программного комплекса ANSYS. В настоящей статье приведены результаты испытаний опытных образцов кладки на сдвиг с обжатием в соответствии с диаграммой Манна-Мюллера (рис. 2) и сопоставление опытных результатов с результатами численного расчета с применением предлагаемой расчетной модели.

Экспериментальные исследования. Для изготовления образцов кладки использовались стандартный раствор и кладочные изделия из плотного бетона размерами 250x120x65 двух видов:

- гиперпрессованный полнотелый кирпич (серия МЦС), относящийся к 1 группе изделий для кладки по классификации [4];
- гиперпрессованный пустотелый кирпич (серия МЦП), относящийся к 2 группе изделий для кладки по классификации [4] (пустотность 28%).

Для дальнейшего использования в численных расчетах были получены прочностные (в соответствии с СТБ EN 772-1-2014 [6] и СТБ EN 1015-11-2012 [7]) и деформационные характеристики материала



а) – кирпича МЦС, б) – раствора
Рис. 4. Общий вид и диаграммы деформирования образцов-призм

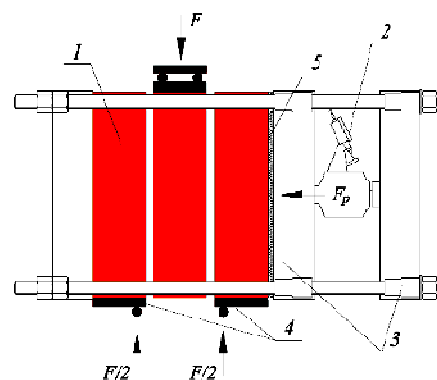
кирпича и растворов. Для определения модуля упругости и коэффициента Пуассона из кирпича выпиливались, а из раствора формировались призмы. Модуль упругости кладочных элементов определялся как секущий модуль при нагрузке, равной одной трети разрушающей нагрузки. Коэффициент поперечной деформации определялся как отношение поперечной деформации к продольной. Общий вид и диаграммы деформирования образцов-призм представлены на рис. 4.

В таблице 1 представлены значения прочностных и деформационных характеристик кирпича и раствора.

Таблица 1. Деформационные и прочностные характеристики кирпича и раствора

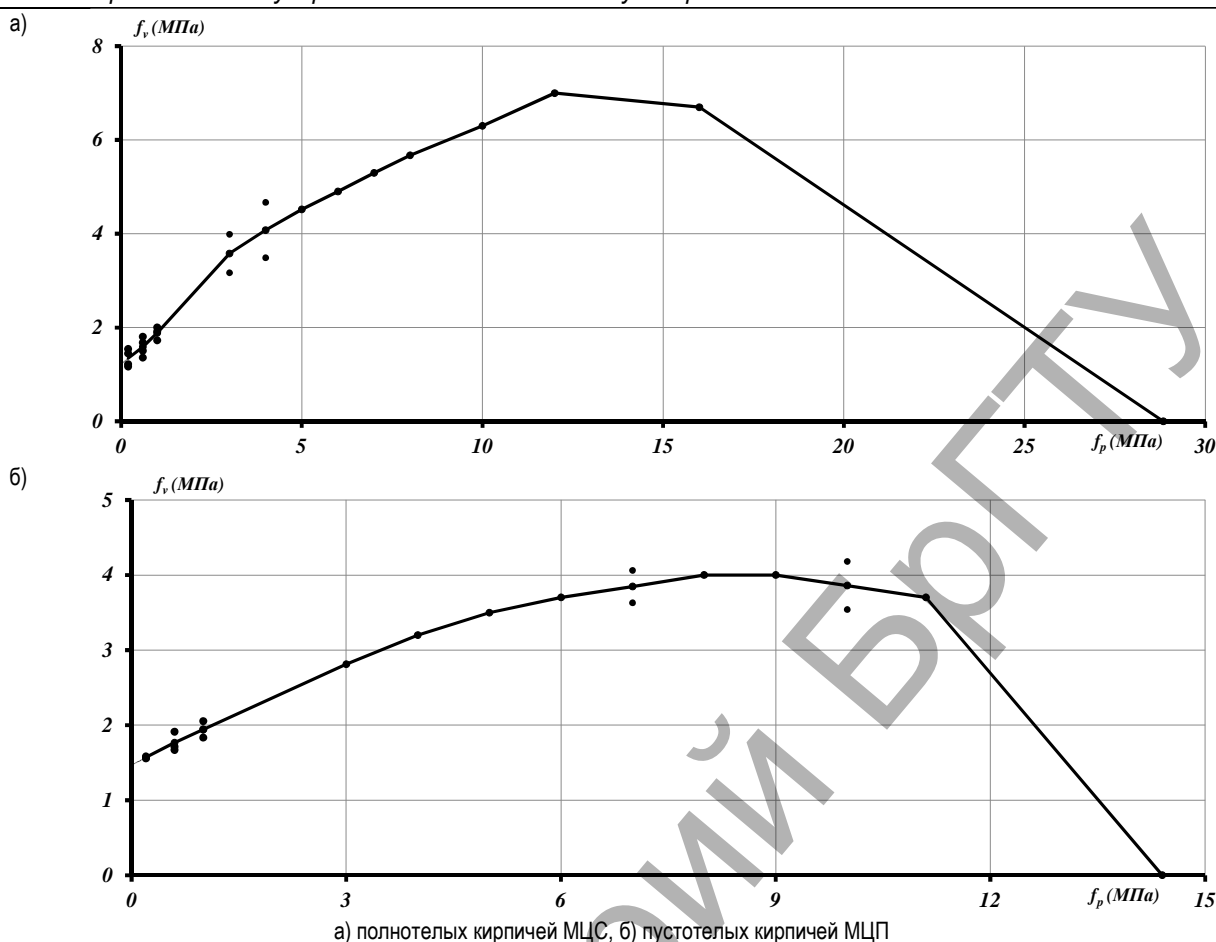
Материал	Прочность при сжатии f_c (МПа)	Прочность при растяжении f_t (МПа)	Модуль упругости E (МПа)	Коэффициент поперечной деформации ν
Кирпич	47	1.56	26300	0.19
Раствор	31	2.5	24200	0.15

Испытания опытных образцов проводились по стандартной методике [8], т.е. определялись начальное сопротивление кладки сдвигу f_{vo} и угол внутреннего трения α при одновременном действии сжимающих и сдвигающих напряжений. Уровень обжатия f_{pi} варьировался в широких пределах вплоть до разрушения образца кладки от сжатия. Схема испытаний приведена на рисунке 5.



1 – испытываемый образец кладки, 2 – динамометр для контроля уровня обжатия, 3 – передаточные пластины для передачи обжатия, 4 – пластины с роликовыми опорами, 5 – гипсовая прокладка

Рис. 5. Схема и общий вид испытаний опытного образца



а) полнотелых кирпичей МЦС, б) пустотелых кирпичей МЦП
 Рис. 6. Графики зависимости сопротивления сдвигу f_v от уровня предварительного обжатия f_p для образцов

На представленных на рис. 6 графиках показаны зависимости напряжений сдвига в кладке f_v от уровня сжимающих напряжений f_p .

В таблице 2 представлены значения начальной прочности при сдвиге и коэффициентов внутреннего трения, а также предельные значения касательного сцепления для кладок обеих серий.

Таблица 2. Значения параметров сдвига для образцов

№ серии	Начальное сопротивление сдвигу $f_{v0,obs}$ (МПа)	Угол внутреннего трения $tg\alpha_{obs}$	Предельные значения касательного сцепления $f_{vlt,obs}$ (МПа)	Максимальное сопротивление при сдвиге $f_{v,max,obs}$ (МПа)
МЦС (полнотелый)	1.22	0.61	3.58	7.0
МЦП (пустотелый)	1.47	0.49	3.20	4.0

По результатам опытных исследований отчетливо прослеживается общая закономерность между напряжениями сдвига и уровнем обжатия, близкая к зависимости, определяемой теорией Манна-Мюллера. Стоит также обратить внимание на максимальные значения прочности образцов кладки при сдвиге. Например, для серии из полнотелых кирпичей МЦС, соотношение между предельным значением касательного сцепления $f_{vlt,obs}$ и максимальным значением прочности $f_{v,max,obs}$ достигает практически 2, что говорит о достаточном запасе работы кладки после потери касательного сцепления. Что касается серии из пустотелых кирпичей МЦП, то данное соотношение составляет 1.25, что может быть следствием быстрой потери устойчивости вертикальных столбов в пределах кладочного элемента.

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.

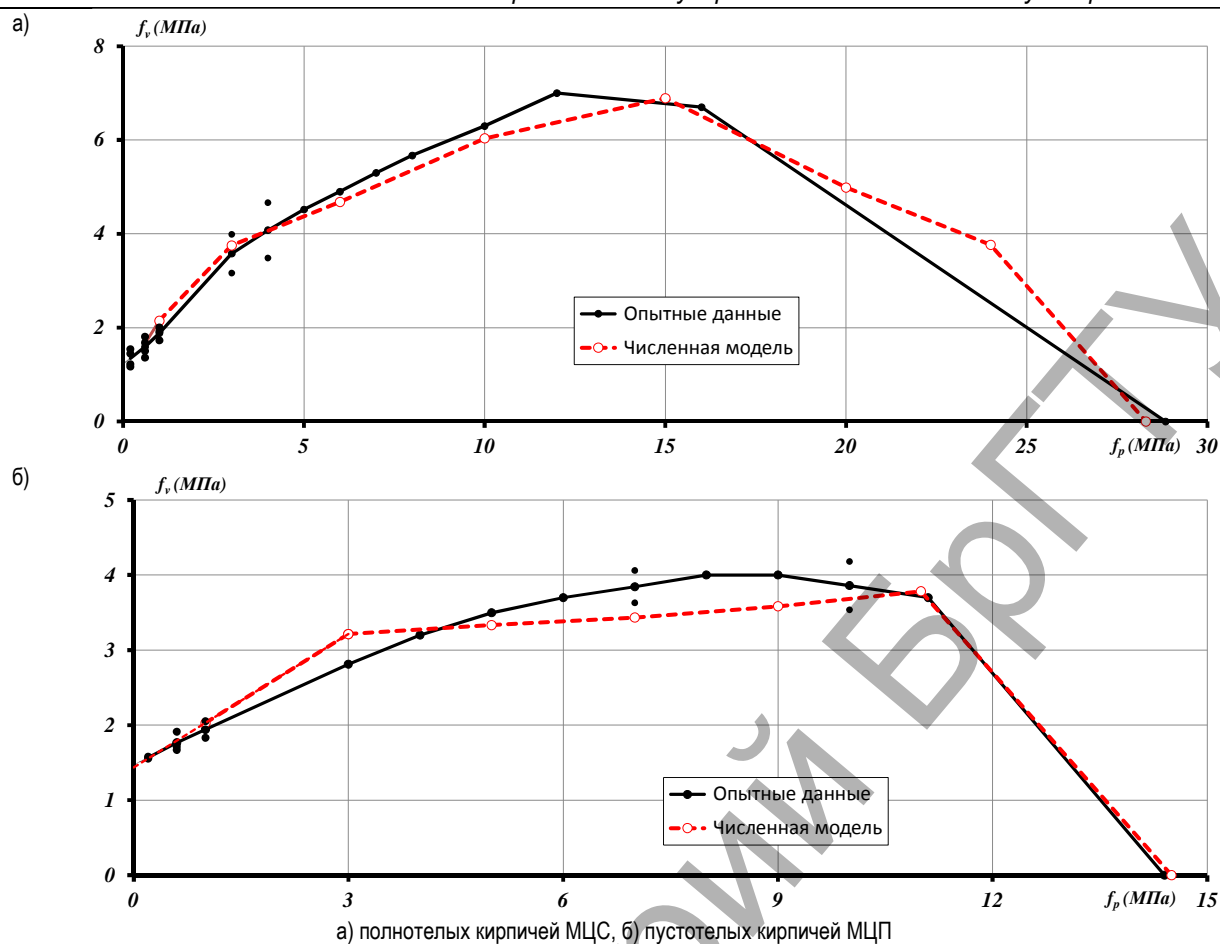
Размер КЭ для образца был принят равным 15 мм. Опирающие опытного образца организовано посредством «скользящей опоры», что моделирует подвижные шарниры в реальном эксперименте. Обжимные пластины находятся в контакте с образцом, одна из пластин закреплена от перемещений в трех ортогональных направлениях, вторая подвержена действию усилия обжатия. Усилие сдвига передается через верхнюю распределительную пластину.

Свойства материала предполагали учет диаграммы деформирования, а также учет появления и развития трещин как в результате превышения предельных растягивающих напряжений, так и в результате превышения предельных сжимающих напряжений. Свойства контакта предполагали учет начального сопротивления сдвигу и коэффициента трения.

На представленных на рис. 7 графиках показаны полученные по результатам расчета зависимости напряжений сдвига в кладке f_v от уровня сжимающих напряжений f_p в сравнении с опытными данными.

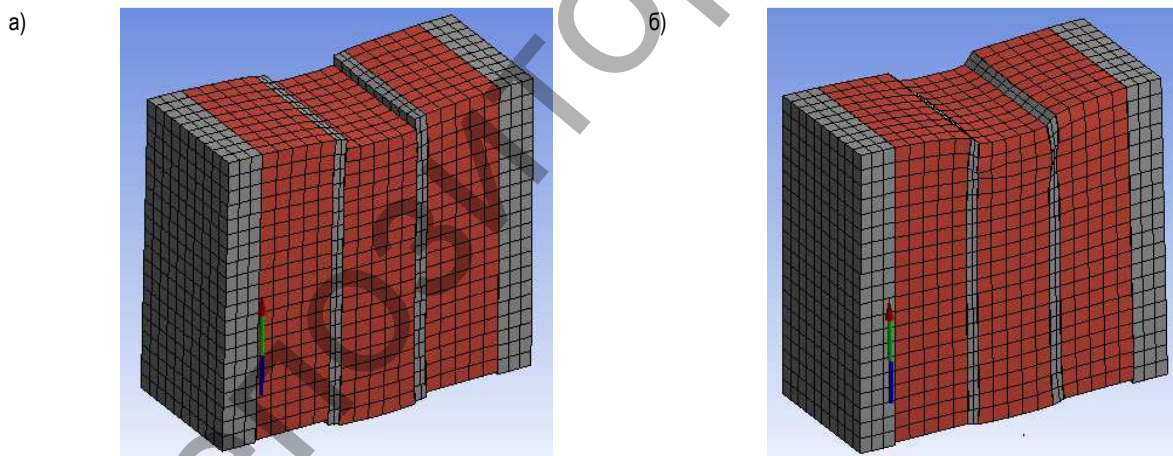
Численный расчет показал хорошую сходимость как с точки зрения самого характера зависимости, так и с точки зрения численных показателей.

На рис. 8 для наглядного представления показан характер деформирования образца в предельном состоянии в зависимости от уровня сжимающих напряжений.



а) полнотелых кирпичей МЦС, б) пустотелых кирпичей МЦП

Рис. 7. Расчетные и экспериментальные графики зависимости сопротивления сдвигу f_v от уровня предварительного обжатия f_p для образцов



а) при низких уровнях обжатия, б) при высоких уровнях обжатия

Рис. 8. Характер деформирования образцов в предельном состоянии

При малом обжатии очевидна работа образца кладки только на сдвиг, а при высоких уровнях обжатия наибольший вклад в обеспечение несущей способности вносит именно работа материала при сжатии.

В таблице 3 представлено численное сравнение данных, полученных экспериментально и по расчету.

Из анализа числовых значений полученных характеристик можно сделать вывод о хорошей сходимости результатов. Лишь при сравнении получаемых значений угла внутреннего трения наблюдалось расхождение до 40%.

Заключение. Разработанная расчетная 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, может быть использована для получения критериальных зависимостей прочности кладки при сдвиге с обжатием на всех этапах ее работы. Данная методика особенно эффективна при недостаточном количестве экспериментальных данных.

Таблица 3. Сопоставление экспериментальных и численных исследований

№ серии	Начальное сопротивление сдвигу, МПа		Угол внутреннего трения		Предельное касательное сцепление, МПа		Максимальное сопротивление при сдвиге, МПа	
	$\frac{f_{vo,obs}}{f_{vo,cal}}$	%	$\frac{tg\alpha_{obs}}{tg\alpha_{cal}}$	%	$\frac{f_{vlt,obs}}{f_{vlt,cal}}$	%	$\frac{f_{v,max,obs}}{f_{v,max,cal}}$	%
МЦС	1.22	-1%	0.61	+39%	3.58	+5%	7.00	-2%
	1.21		0.85		3.75		6.89	
МЦП	1.47	-2%	0.49	+20%	3.20	+0.5%	4.00	-6%
	1.44		0.59		3.21		3.78	

СПИСОК ЦИТИРОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Mann, W. Bruchkriterien für querkraftbeanspruchtes Mauerwerk und ihre Anwendung auf gemauerte Windscheiben. Die Bautechnik / W. Mann, H. Müller. – Heft 12. – Berlin: Ernst & Sohn, 1973. – S. 421–425.
- Mauerwerk nach Eignungsprüfung; Berechnung und Ausführung: DIN 1053. – Berlin: Deutsches Institut für Normung, 1984. – Teil 2. – 13 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- Методы испытаний изделий для каменной кладки: СТБ EN 772-1-2014. – Введ. 01.01.2015. – Часть 1. Определение прочности при сжатии. – Минск: Госстандарт. – 14 с.
- Методы испытаний растворов для каменной кладки. Определение прочности затвердевшего раствора при изгибе и сжатии: СТБ EN 1015-11-2012. – Введ. 01.09.2013. – Часть 11. – Минск: Госстандарт. – 12 с.
- Методы испытания каменной кладки. Определение начальной прочности при сдвиге: СТБ EN 1052-3-2008 – Введ. 20.02.2008. – Часть 3. – Минск: Госстандарт. – 12 с.

Материал поступил в редакцию 03.02.16

DEMCHUK I.E. Experimental and theoretical studies of masonry in shear with pre-compression

Experimental and numerical studies of shear strength of masonry from concrete masonry units were carried out. Based on the results of experimental studies the dependences of the shear strength of the masonry from the level of compressive stresses were identified. The obtained data was compared with the results of numerical calculations. The reasonability of application of the developed numerical model for further studies with a lack of experimental data was revealed.

УДК 69.022

Царук О.Г.

ПРОЧНОСТЬ ПРИ СЖАТИИ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ИЗ КРУПНОФОРМАТНЫХ СИЛИКАТНЫХ БЛОКОВ С ПАЗОГРЕБНЕВЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ШВОВ

Введение. Каменные кладки из крупноформатных силикатных блоков находят широкое применение в современном строительстве благодаря их технологичности и невысокой стоимости. Такие кладки применяются при возведении несущих и ненесущих стен, стен, являющихся заполнением монолитных железобетонных каркасов, внутренних межквартирных и межкомнатных перегородок. Благодаря высоким прочностным и звукоизоляционным характеристикам, стены и перегородки из силикатных блоков могут возводиться небольшой толщины, при этом необходимые теплотехнические характеристики наружных стен обеспечиваются слоем теплоизоляции. Кладки из силикатных блоков возводятся на тонкослойных растворных швах с пазогребневым соединением вертикальных швов без заполнения их раствором.

Необходимо отметить, что в 2011 году в Республике Беларусь в СЗАО «Кварцмелпром» введен в эксплуатацию завод по производству крупноформатных силикатных изделий, которые могут применяться для возведения кладок на тонкослойных швах. При этом, в действующих отечественных нормах отсутствуют данные о прочностных и деформационных характеристиках указанных кладок, что делает невозможным их применение при проектировании каменных конструкций.

На данном этапе работы в задачи исследований входило:

- выявление механизмов деформирования и разрушения камен-

ных кладок при сжатии;

- определение характеристических значений прочности кладок при сжатии – f_k ;
- определение деформационных характеристик каменных кладок (секущего модуля упругости E и коэффициента поперечной деформации ν).

Методика экспериментальных исследований. Определение прочностных и деформационных характеристик каменной кладки при сжатии производилось на образцах, изготовленных из крупноформатных силикатных полнотелых кладочных элементов на тонкослойном растворе.

В соответствии с Еврокодом 6 [1] прочностные и деформационные характеристики каменных кладок определяются на основании аналитических зависимостей или испытаний опытных образцов согласно стандартам серии СТБ EN 1052.

Форма и размеры образцов кладок назначались в соответствии с СТБ EN 1052-1-2015 [2]. Средняя приведенная прочность силикатных блоков при сжатии f_B составила 22.5 МПа, средняя прочность раствора $f_m=10.3$ МПа. Было испытано две серии образцов из кладочных элементов различных размеров:

Царук Ольга Григорьевна, младший научный сотрудник филиала РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр. Беларусь, 224023, г. Брест, ул. Московская, 267/2.