

Галалюк А.В., аспирант, Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест

Демчук И.Е., аспирант, Филиал РУП «Институт БелНИИС» - Научно-технический центр, г. Брест

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗЦОВ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ СЖАТИИ

NUMERICAL MODELING OF COMPRESSION TEST OF MASONRY SPECIMENS

Аннотация

Рассмотрены особенности КЭ-моделирования каменной кладки. Приведены результаты экспериментальных и численных исследований образцов кладки, подверженных сжатию. Произведено сравнение напряженно-деформированного состояния образцов кладки по результатам испытаний с результатами численного расчета.

Abstract

The features of the FE-modeling of masonry have been considered. The results of experimental and numerical researches of specimens of masonry subjected to compression have been presented. A comparison of the stress-strain state of specimens of masonry in testing with the results of numerical calculation has been compared.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с Еврокодом 6 [1] прочностные и деформационные характеристики каменных кладок определяются на основании аналитических зависимостей или испытаний опытных образцов согласно стандартам серии EN1052.

Изготовление и испытание опытных образцов кладки требуют специального оборудования и существенных материальных и временных затрат.

В последнее время за рубежом для получения прочностных и деформационных характеристик каменной кладки используются численные расчеты с применением программных комплексов ANSYS и DIANA. Для расчета, как правило, используют метод микромоделирования, в котором кирпич и раствор аппроксимируются конечными элементами со своими деформационными и прочностными характе-

ристиками. При этом могут быть учтены свойства контакта по границе «камень-раствор», а также физическая нелинейность материалов. На микромоделях каменной кладки можно получить характерное напряженно-деформированное состояние: а) трещины в растворных швах, б) скольжение вдоль горизонтальных и вертикальных швов при малых значениях нормальных напряжений, в) трещины в кладочных элементах в направлении растяжения, г) наклонные трещины от растяжения в кладочных элементах, д) «раздробление кладки». Недостаток данного подхода состоит в том, что даже упрощенная методика микромоделирования становится нереализуемой в случае реальных конструкций, включающих большое количество элементов. Альтернативный способ должен описывать поведение кладки с точки зрения макроуровня или средних напряжений и деформаций, при этом каменная кладка рассматривается как однородный материал.

Анализ каменных конструкций, состоящих из большого количества кладочных элементов и швов, может быть выполнен только с использованием макромоделей, в которых зависимость между средними напряжениями и деформациями строго установлена. При этом следует учитывать анизотропию каменной кладки, несмотря на то, что свойства кладочных элементов и раствора являются изотропными [2].

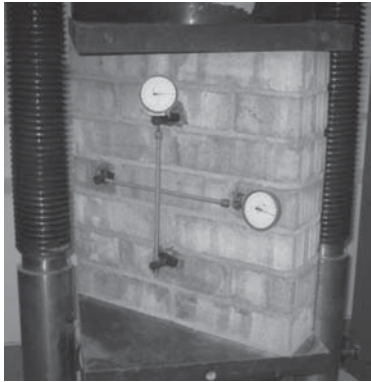
Конечно-элементная сетка в таких моделях не зависит от геометрического расположения составных элементов кладки. Другими словами, площадь одного конечного элемента может включать в себя фрагмент из кладочных элементов и растворных швов. Это предполагает более обобщенный способ анализа, а соответственно точность такого метода ниже, чем микромоделирования вследствие усреднения значений напряжений.

Цель настоящей работы заключалась в сравнении результатов численного расчета микро- и макромоделей образца каменной кладки, подверженного сжатию, а также в сравнении полученных значений напряжений и деформаций с результатами экспериментальных исследований.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Определение деформационных характеристик каменной кладки производилась на образцах, изготовленных из керамических полнотелых кладочных элементов. Образцы были выполнены в соответствии с EN 1052-1 [3].

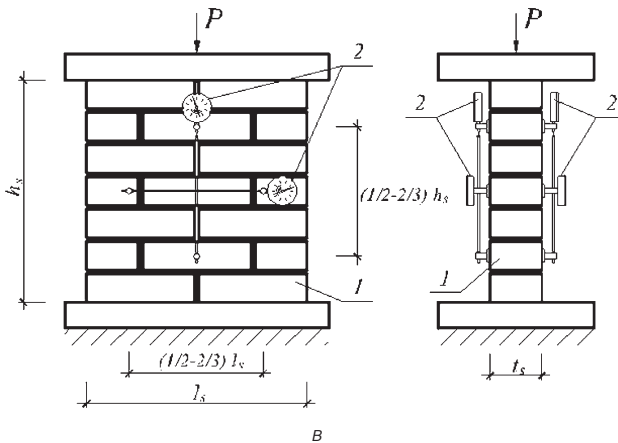
Для испытания образцов применялся гидравлический пресс П-125. Для измерения перемещений использовались механические индикаторы часового типа, установленные на базе от 280 до 300 мм (см. рис. 1).



а



б



в

Рисунок 1. Схема испытаний опытных образцов: а – общий вид, б – характер трещинообразования, в – схема расстановки приборов (1 – образец кладки, 2 – индикаторы перемещений часового типа ИГП-1 с ценой деления 0,001 мм; $h_s = 515$ мм; $l_s = 510$ мм; $t_s = 120$ мм)

Было испытано три серии образцов с приложением нагрузки перпендикулярно горизонтальным растворным швам. Каждая серия включала в себя 8–9 испытываемых образцов для определения модулей упругости и 4–5 испытываемых образцов для определения коэффициентов Пуассона. Образцы изготавливались с применением кладочного раствора различной прочности при неизменной нормализованной прочности кладочных элементов, определенной в соответствии с [4] и равной $f_b = 44,1$ МПа при сжатии перпендикулярно «постели».

Серия КРО-1 изготавливалась на растворе прочностью $f_m=10,9$ МПа; КРО-2 – $f_m=7,9$ МПа; КРО-3 – $f_m=3,1$ МПа. Общий вид, характер трещинообразования, а также геометрические характеристики и схема расстановки измерительных приборов представлены на рис. 1.

Для определения деформационных характеристик кладочных элементов и кладочных растворов были изготовлены четырехгранные призмы размерами: 250×65×65 мм и 300×70×70 мм соответственно. Общий вид образцов при испытании и характер трещинообразования представлен на рис. 2.

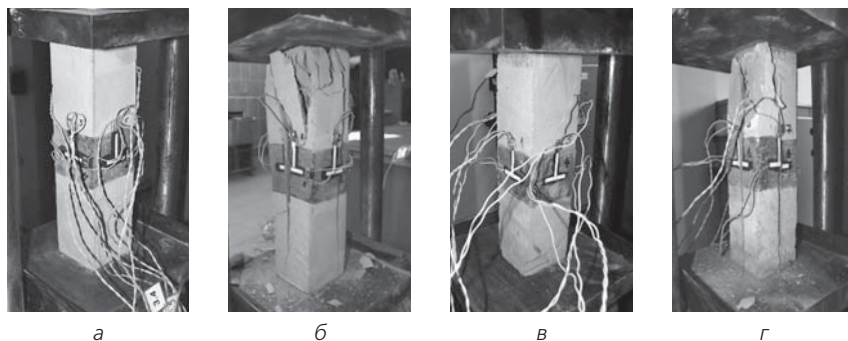


Рисунок 2. Схема испытаний и характер трещинообразования опытных образцов:
а, б – растворяных призм размером 300×70×70 мм,
в, г – призм, выпиленных из кирпича размером 250×65×65 мм

Растворные призмы изготавливались из раствора, который применялся при выполнении опытных образцов кладки. Для приготовления кладочных растворов использовалась сухая растворная смесь № 111/11 М100 по [5] производства ОАО «Красносельскстройматериалы». Из данной растворной смеси путем изменения пропорций составляющих готовилась растворная смесь других прочностных показателей. Прочность кладочного раствора при сжатии устанавливалась на основании европейского стандарта [6].

Керамические призмы выпиливались из кирпича, применяемого для изготовления опытных образцов кладки.

Образцы-призмы испытывались при помощи гидравлического пресса П-10. Для измерения относительных деформаций кирпича и раствора использовались тензодатчики с базой 20 мм и автоматический измеритель деформаций АИД-4.

Модуль упругости кирпичной кладки, а также кладочных элементов и раствора (E , E_{bi} , E_{mi}) определялся как секущий модуль при сред-

нем значении относительной деформации измеренной в двух точках ε_i и нагрузке равной одной трети разрушающей нагрузки $F_{i,max}$ (1).

$$E_i = \frac{F_{i,max}}{3\varepsilon_i A_i}, \quad (1)$$

где:

$F_{i,max}$ — максимальная нагрузка воспринимаемая образцом каменной кладки, кладочным элементом или раствором;

A_i — площадь поперечного сечения образца;

ε_i — относительные продольные деформации.

Коэффициент поперечной деформации ν (коэффициент Пуассона) определялся как отношение поперечной деформации к продольной (2).

$$\nu = \left| \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_y} \right|, \quad (2)$$

ε_x — относительные поперечные деформации;

ε_y — относительные продольные деформации.

По результатам испытаний строились диаграммы деформирования образцов кирпича, раствора и каменной кладки (рис. 3) и определялись их деформационные характеристики (табл. 1, 2).

Таблица 1

Деформационные характеристики кирпича и раствора

Материал	Модуль упругости E, МПа	Коэффициент поперечной деформации ν
Полнотелый керамический кирпич	11850	0,113
Раствор:		
— М 31	4600	0,23
— М 79	9210	0,19
— М 109	10580	0,17

Таблица 2

Деформационные характеристики каменной кладки [7]

№ серии	Модуль упругости E, МПа		Коэффициент поперечной деформации ν	
	E_x	E_y	ν_x	ν_y
КРО-1	11150	9830	0,165	0,22
КРО-2	10680	8450	0,23	0,3
КРО-3	6450	5150	0,32	0,35

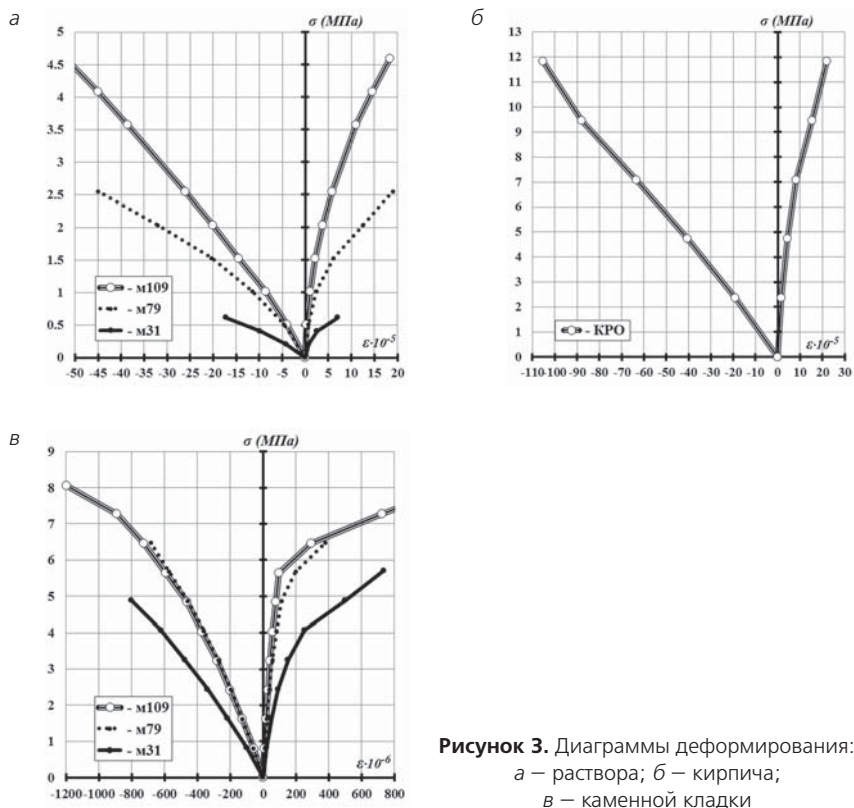


Рисунок 3. Диаграммы деформирования:
 а – раствора; б – кирпича;
 в – каменной кладки

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В рамках исследования было произведено микро- и макро моделирование опытного образца каменной кладки в среде ANSYS 14.0.

Для создания конечно-элементной модели применялся трехмерный (3D) элемент объемного НДС с двадцатью узлами SOLID 186. Элемент SOLID 186 имеет квадратичное представление перемещений и может использовать нерегулярную форму сетки.

Узлы элемента имеют три степени свободы: перемещения в направлении осей X, Y и Z узловой системы координат. Элемент SOLID 186 обладает свойствами пластичности, гиперупругости, ползучести, изменения жесткости при приложении нагрузок, больших перемещений и больших деформаций. Кроме того, элемент может иметь свойства анизотропного материала. Направления осей анизотропии материала соответствуют направлениям системы координат элемента.

Геометрия элемента, расположение узлов и система координат элемента показаны на рис. 4.

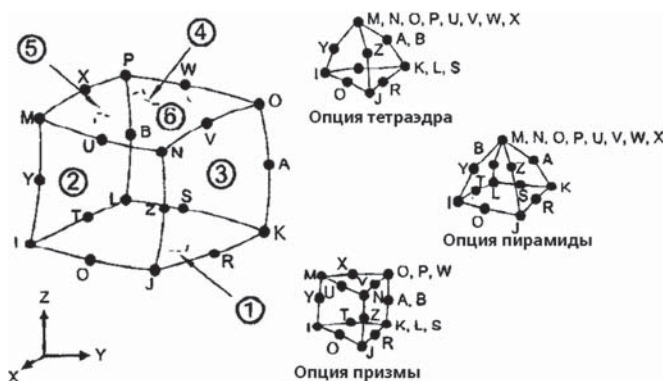


Рисунок 4. Геометрия элемента SOLID 186

Геометрические размеры образца для макро моделирования и микро моделирования были приняты $510 \times 515 \times 120$ мм при толщине растворного шва в случае микро модели 10 мм. К образцу через стальные плиты прикладывалась равномерно распределенная нагрузка.

Микро- и макро модели с разбиением на конечные элементы и приложенной нагрузкой представлены на рис. 5.

Длина баз для регистрации деформаций в вертикальном и горизонтальном направлениях была принята равной 290 мм.

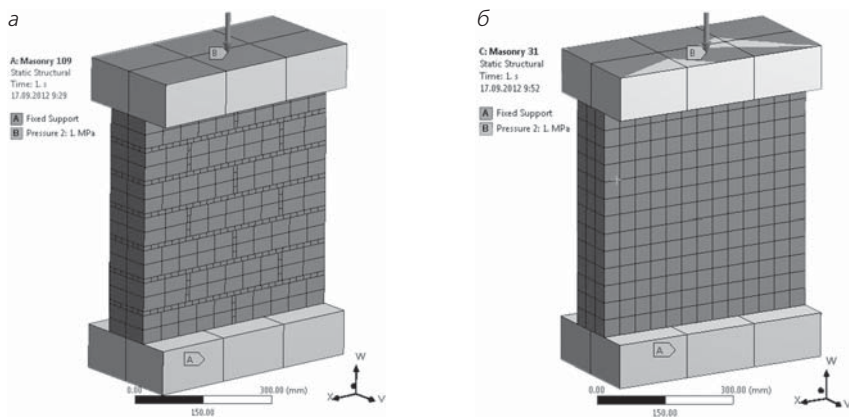


Рисунок 5. КЭ-модели образцов каменной кладки:
а – микро модель, б – макро модель

Размер конечных элементов в случае микромодели для кладочных элементов был принят 60 мм, для растворных швов – 20 мм. В случае макромодели размер конечных элементов для кладки был принят равным 40 мм.

В случае микромодели между кладочными элементами и раствором контакт задавался жестким с использованием опции «bonded». Контакт между кладкой и металлическими плитами прессы задавался при помощи опции «frictional» со значением коэффициента трения 0,2. Нижняя опорная плита закреплена в нижней опорной части от перемещений в трех ортогональных направлениях. К верхней опорной плите приложено усилие в вертикальном направлении.

На рис. 6 показано распределение сжимающих напряжений на микро- и макромоделях. Распределение напряжений в первом и во втором случае очень схожи и свидетельствуют об образовании под грузовыми и опорными пластинами уплотнений каменной кладки в виде клиньев, под действием которых происходит ее разрушение от преодоления сопротивления сдвигу, отрыву и сжатию.

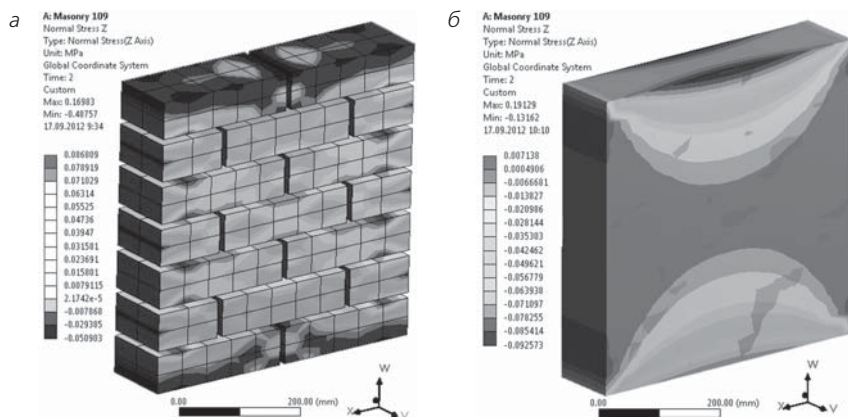


Рисунок 6. Характер распределения сжимающих напряжений в КЭ-моделях каменной кладки: *а* – микромодель, *б* – макромодель

Данный механизм разрушения кладки при сжатии описан в работе [8].

На рис. 7 приведены расчетные и экспериментальные диаграммы деформирования опытных образцов кладки. Сравнение полученных диаграмм деформирования свидетельствует об удовлетворительном согласовании результатов расчета с экспериментальными данными. Следует отметить некоторые отличия в расчетных и эксперименталь-

ных деформациях микромоделей серий КРО-1с и КРО-3с. Указанные отличия объясняются погрешностью оценки контактных свойств материалов испытанных образцов (начального сопротивления сдвигу кладочного раствора и коэффициента внутреннего трения). Однако, решение такой задачи сопряжено с высокими аппаратными затратами, что является абсолютно нецелесообразным в случае проведения практических расчетов. В упругой стадии работы имело место практически полное совпадение деформаций микромоделей с экспериментальными данными и с деформациями макромоделей.

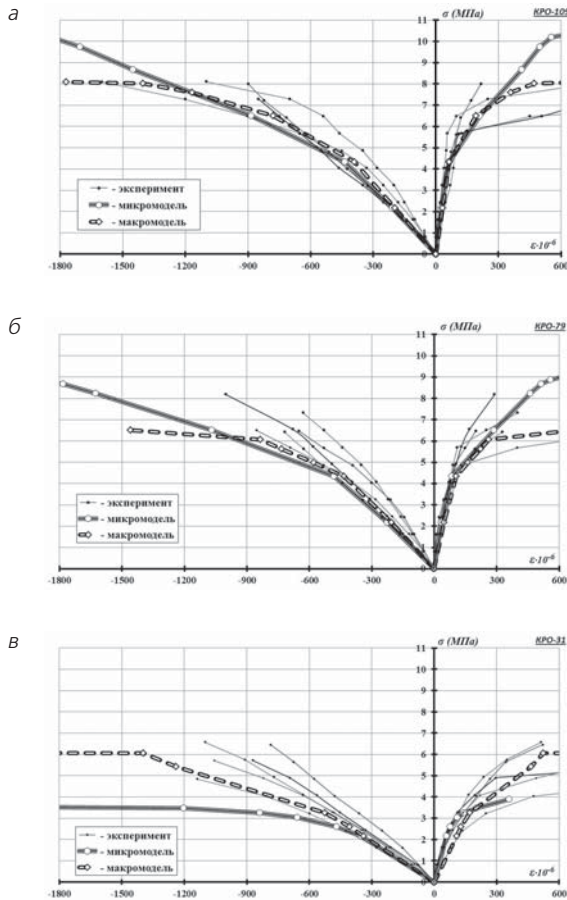


Рисунок 7. Диаграммы деформирования опытных образцов кладки и КЭ-моделей: а – серия образцов КРО-1с, б – серия образцов КРО-2с, в – серия образцов КРО-3с

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследования показали удовлетворительную сходимость результатов численного анализа образца каменной кладки, подверженного сжатию, с результатами экспериментальных исследований. Численным расчетом микромоделей можно определять деформационные и прочностные характеристики каменной кладки, заменяя трудоемкие и дорогостоящие эксперименты. Следует развивать исследования каменной кладки, направленные на совершенствование микромоделей, позволяющих учитывать физическую нелинейность материалов, нелинейность работы слоев кладки в зонах контакта, механику разрушения материалов.

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. — 128 с.
2. *Lourenço P.B.* Computational Strategies for Masonry Structures. PhD thesis, Technical University Delft. Delft University Press, The Netherlands, ISBN 90-407-1221-2, 1996. — 220 p.
3. Методы испытаний каменной кладки. Часть 1. Определение прочности при сжатии: EN 1052-1. — Введ.07.10.1998. — CEN/TC 125. — 10 с.
4. Методы испытаний строительных блоков. Часть 1. Определение прочности при сжатии: СТБ EN 772-1-2008. — Введ. 01.01.09. — Минск: Госстандарт. — 9 с.
5. СТБ 1307-2002 Смеси растворные и растворы строительные. Технические условия — Введ. 01.07.2002. — Минск: Госстандарт. — 18 с.
6. Методы испытания раствора для каменной кладки. Часть 11. Определение прочности на растяжение при изгибе и прочности при сжатии затвердевшего раствора: EN 1015-11:1999+A1:2006. — Brussels: CEN/TC 125. — 18 с.
7. *Деркач В.Н.* Деформационные характеристики каменной кладки в условиях плоского напряженного состояния / В.Н. Деркач // Строительство и реконструкция. — Орел: ОрелГТУ. — 2012. — № 2 (40). — С. 3—11.
8. *Соколов Б.С.* Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций: Научное издание. / Б.С. Соколов, А.Б. Антаков — М.: Издательство АСВ, 2010. — 104 с.

Получено 20.09.12.