

**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].

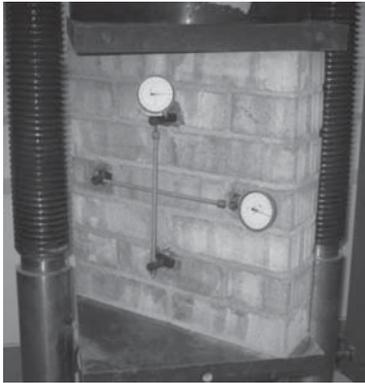
Конечно-элементная сетка в таких моделях не зависит от геометрического расположения составных элементов кладки. Другими словами, площадь одного конечного элемента может включать в себя фрагмент из кладочных элементов и растворных швов. Это предполагает более обобщенный способ анализа, а соответственно 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].

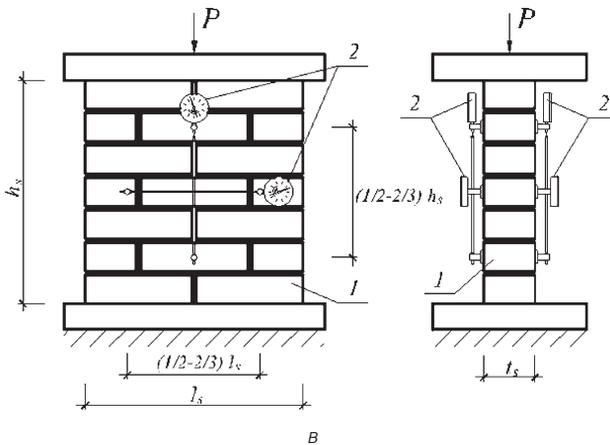
Для испытания образцов применялся гидравлический пресс П-125. Для измерения перемещений использовались механические индикаторы часового типа, установленные на базе от 280 до 300 мм (см. рис. 1).



а



б



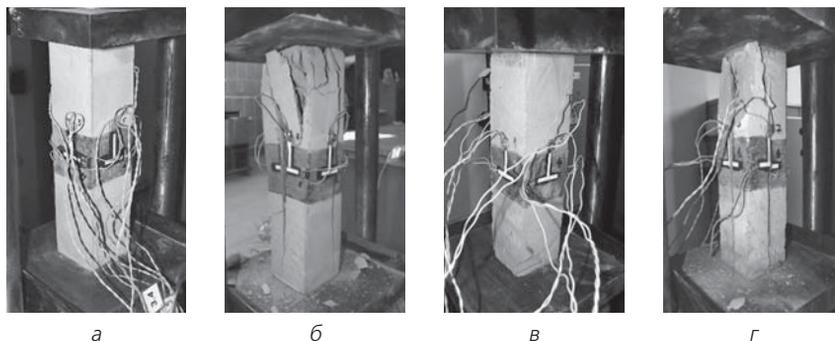
в

**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  $\varepsilon_i$  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;

$\varepsilon_i$  — относительные продольные деформации.

Коэффициент поперечной деформации  $\nu$  (коэффициент Пуассона) определялся как отношение поперечной деформации к продольной (2).

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

$\varepsilon_x$  — относительные поперечные деформации;

$\varepsilon_y$  — 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

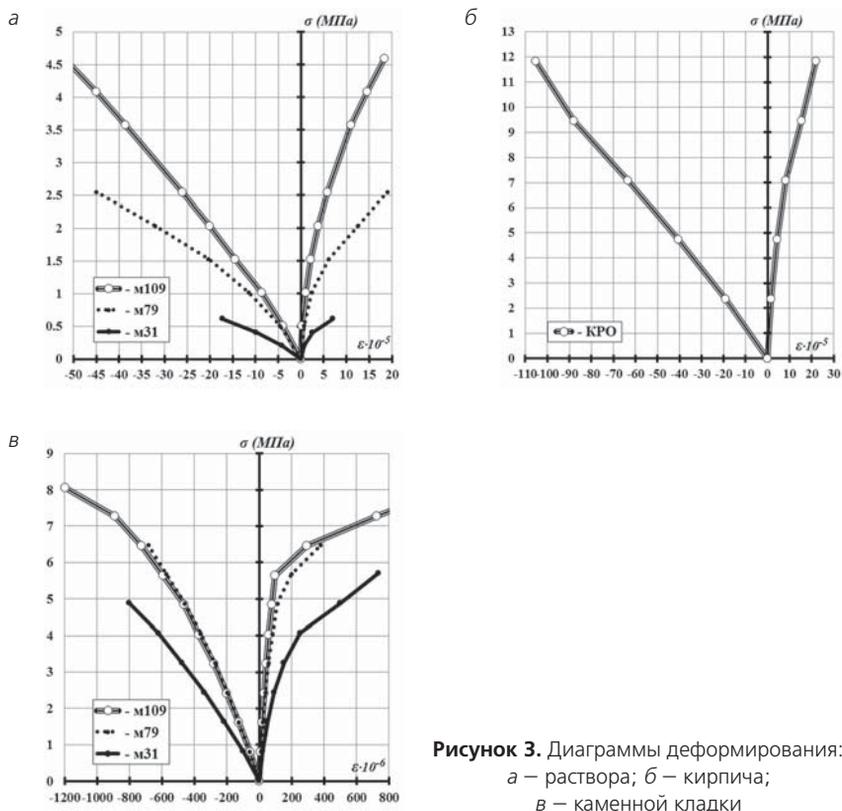
**Деформационные характеристики кирпича и раствора**

| Материал                       | Модуль упругости E, МПа | Коэффициент поперечной деформации $\nu$ |
|--------------------------------|-------------------------|---|
| 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 $\nu$ |         |
|---------|-------------------------|-------|---|---------|
|         | $E_x$                   | $E_y$ | $\nu_x$                                 | $\nu_y$ |
| 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.

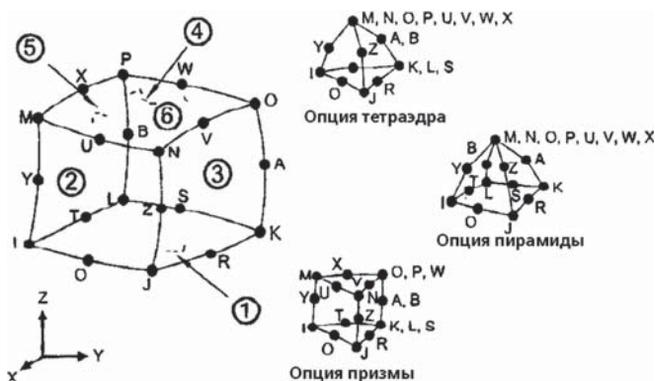


Рисунок 4. Геометрия элемента SOLID 186

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.

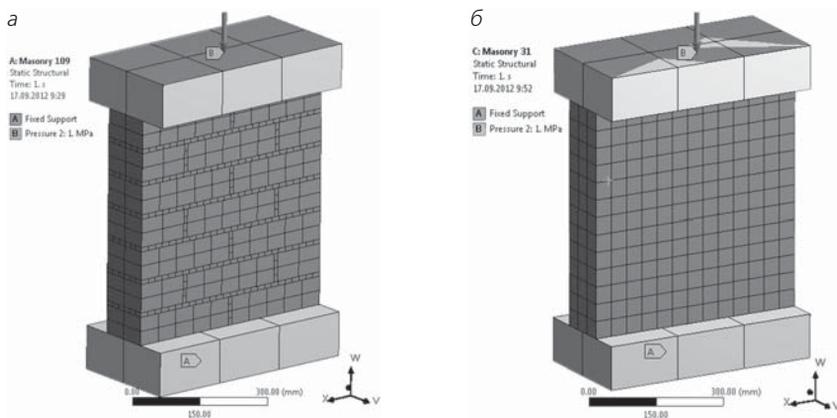
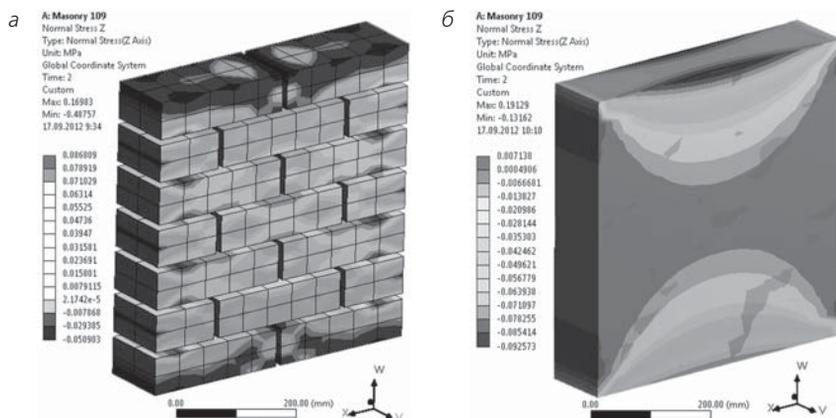


Рисунок 5. КЭ-модели образцов каменной кладки:  
а – микро модель, б – макро модель

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.

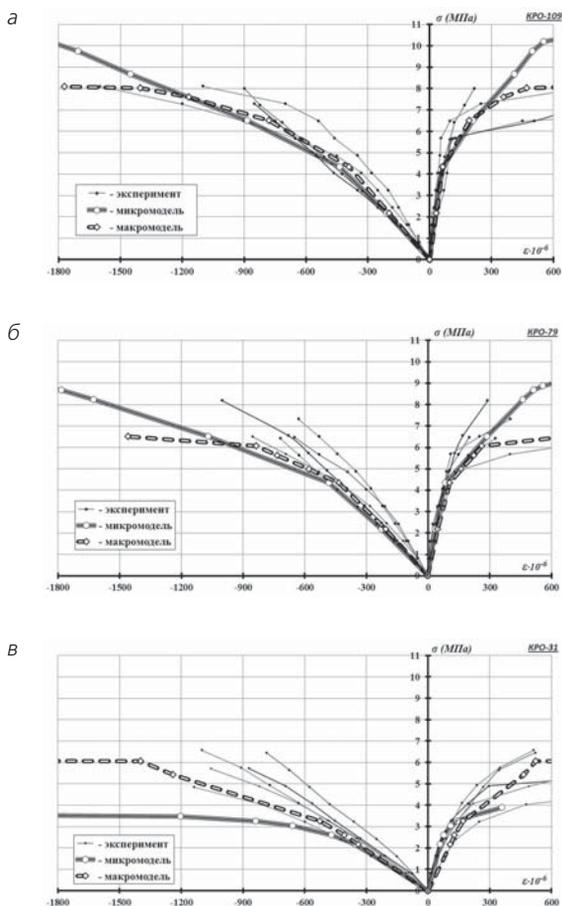


**Рисунок 6.** Характер распределения сжимающих напряжений в КЭ-моделях каменной кладки: *а* – микромодель, *б* – макромодель

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.*