



Research Article

Received: September 17, 2024

Accepted: October 1, 2024

Published: October 10, 2024

ISSN 2304-6295

## Modeling the work of brickwork under compression

Mirsayapov, Ilshat Talgatovich<sup>1</sup> Antakov, Alexey Borisovich<sup>1</sup> Pavlov, Maksim Nikolaevich<sup>1</sup> <sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russian Federation,[mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru) (M.I.T); [antakof@mail.ru](mailto:antakof@mail.ru) (A.A.B); [pavlov.m.n@bk.ru](mailto:pavlov.m.n@bk.ru) (P.M.N)Correspondence: \* email [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru); contact phone [+79083333398](tel:+79083333398)

### Keywords:

Construction; Masonry; Endurance; Compression

### Abstract:

**The object of research** of the current state of the field of masonry application is characterized by a variety of constructive and technical solutions, a variety of characteristics of the materials and products used. Research in the field of strength and deformability of masonry, including those reinforced in various ways, is relevant and aimed at increasing the degree of reliability and safety. **Method.** Comprehensive experimental studies of masonry made of various materials, including reinforced and reinforced with clips, have been carried out. **Results.** Experimentally, data on the stressed-deformed state and peculiarities of the mechanisms of destruction of stone and reinforced stone masonry used in the development of theoretical foundations and models of calculation methods using the diagram method were obtained. As a result of many years of experimental studies, qualitative and quantitative characteristics of the stressed-deformed state of stone and reinforced stone masonry, considered during the construction of design models for the operation of compressed structures, were obtained.

## 1 Introduction

Принципиальным отличием данной теории от существующих подходов к оценке прочности и трещиностойкости сжатых конструкций и элементов является учет величин сопротивлений материала растяжению и сдвигу при определении прочности на сжатие. Для этого основное расчетное выражение записано с использованием деформационных характеристик, что позволило в сочетании с анализом множества экспериментальных данных по испытаниям опытных образцов аналитически описать стадии напряженного состояния и получить алгоритм построения диаграмм деформирования материала сжатой каменной кладки в характерных напряженных зонах:  $\sigma - \varepsilon, \sigma_t - \varepsilon_t, \tau - \gamma$ . Данная методика оценки напряженно-деформированного состояния материала каменных кладок сжатых конструкций и элементов является принципиально новой по отношению к существующим и может быть предложена для внедрения в нормы проектирования.

Область применения каменных кладок характеризуется множеством конструктивных и технических решений, многообразием характеристик применяемых материалов и изделий. При этом проектирование каменных, армокаменных конструкций и их усиления выполняется на основе эмпирических методик и зависимостей, полученных в 1900–2000 гг., учеными Онищиком Л.И. [1], Гениевым Л.Д. [2] и другими.

В 2000–2024 гг., преобладают исследования на основании деформационных и других подходов расчета каменных конструкций.

Предложен деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов авторами: Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М. Предложена методика расчета, которая дает



возможность на всех уровнях нагружения получать параметры НДС элементов произвольной формы поперечного сечения с любыми параметрами армирования и различными эксцентриситетами приложения продольных усилий. Предложен критерий расчета, позволяющий учесть перераспределения усилий. Выполнен сравнительный анализ между теоретическими и экспериментальными данными [3]-[4].

Предложен метод расчета прочности нормальных к продольной оси сечений конструкций из каменной кладки с учетом диаграмм деформирования автором: Хаткевич А.М. Разработан алгоритм расчета. Выполнено сравнение результатов экспериментальных данных с вычисленными значениями разрушающих нагрузок [5].

Предложен локальный подход к определению напряженно-деформированного состояния центральносжатой кирпичной кладки занимался: Наумов А.Е. Представлен локальный подход к учету геометрических и физических неоднородностей горизонтального растворного шва при определении прочности центральносжатой кладки [6]-[7].

Исследованием экспериментально-аналитического сопротивления каменной кладки сжатию занимались: Артюшин Д.В., Шумихина В.А. Выполнены экспериментальные исследования стандартных призм из каменной кладки на основе теории сопротивления срезу сжатых и растянутых элементов. Предложены расчетные модели и аналитические зависимости сопротивления каменной кладки при сжатии [8].

Приведен расчет каменной кладки при центральном сжатии как квазиоднородное сплошное упругопластичное тело автором: Плотников А.Н. Представлен расчет по полученными экспериментальными данными с учетом пластической работы. Приведены результаты испытаний каменной кладки из нетрадиционного для нормативной базы материала – пустотного керамического кирпича [9].

Приведен сравнительный анализ феноменологических критериев прочности каменной кладки при двусосном сжатии авторами: Лихачев С.Ю., Поздеев М.Л., Смагин И.В. Описаны феноменологические критерии прочности каменных кладок как ортотропных композитов. Проведено сравнение применимости первого и второго критериев прочности для описания экспериментальных данных на двусосное сжатие [10]-[11].

Исследованием роли растворной составляющей в сопротивлении каменной кладки силовому сжатию занимались: Донченко О.М., Дегтев И.А., Тарасенко В.Н. Приведено объяснение сложного деформативно-прочностного состояния раствора горизонтальных швов в каменной кладке при силовом сжатии. Приведена аналитическая зависимость структурной неоднородности растворной постели от прочности раствора на сжатие и растяжение [12].

Исследованием применения компьютерного моделирования при оценке напряженно-деформированного состояния несущих конструкций зданий из каменной кладки занимались: Бедов А.И., Габитов А.И., Галлямов А.А., Салов А.С., Гайсин А.М. Выполнены экспериментальные, аналитические и численные исследования высокопустотных керамических изделий, установлен характер их работы под нагрузкой, предложен механизм разрушения. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов [13].

Исследованием прочности на сжатие разнородных каменных кладок занимались: Бенедетти А., Тароцци М. Выполнены экспериментальные и численные исследования, предложен аналитический метод расчета каменной кладки [14].

Исследованием прочности на сжатие неармированного глиняного кирпича занимались: Джоши Д.А., Джайн Р.К. Выполнен физический эксперимент неармированной каменной кладки из глиняного кирпича на сжатие. Описан механизм разрушения призм при одноосной сжимающей нагрузке [15].

Исследованием прочности кирпичной кладки на разрыв занимались: Мадхави К., Ренука Деви М.В., Джагадиш К.С. Выполнены физические и численные исследования каменной кладки под углом 45 градусов. Оценена несущая способность аналитическим методом на основе численных исследований [16].

Экспериментальные характеристики кирпичной кладки для оценки поперечной прочности получены: Хан Я, Ашраф М., Фахим М. Выполнен физический эксперимент каменной кладки на сжатие, получены эмпирические данные для расчета на прочность [17].

Исследованием прочности на сжатие кирпичной кладки из туфа занимались: Гуаланьюоло М., Аурилио М., Базиль А., Фаэлла Д. Получены эмпирические данные для расчета кирпичной кладки из туфа для сейсмических районов строительства [18].

Исследованием основных механических свойств монолитной кладки из газобетонных блоков без применения раствора занимались: Тяньсян Пи, Чжунхэн Ду, Хучен Чжан, Сичэн Ван. Выполнены физические, численные и аналитические исследования [19].

Анализ научных публикации позволяет сделать следующие выводы, несмотря на некоторые полемические разногласия в подходах, терминах и трактовках явлений, позволили выявить и сформулировать понятия, определяющие направление дальнейших исследований и особенности расчетных предпосылок:

- каменная кладка – композитный материал с регулярной структурой и разномодульными включениями, проявляющий анизотропные свойства под нагрузкой;
- кирпич или камень в составе кладки находится в условиях сложного напряженного состояния, зависящего от внешних действующих усилий и конструктивных несовершенств – вариативность физико-механических свойств растворных швов и собственные дефекты кирпича;
- в сжатых элементах кирпич/камень воспринимает вторичные растягивающие напряжения в поперечных направлениях, тогда как раствор постельных швов сжат;
- при определении прочности конструкций из каменной кладки на сжатие должны учитываться сопротивления составляющих материалов на растяжение и сдвиг;
- наиболее достоверно НДС элементов и конструкций из каменных кладок описывается экспериментальными диаграммами деформирования. Теоретические построения с использованием методик свод правил каменные и армокаменные конструкции 15.13330.2020 [20] и Еврокод 6: Проектирование каменных конструкций EN 1996 [21] относительно достоверны в пределах упругой стадии работы кладки.

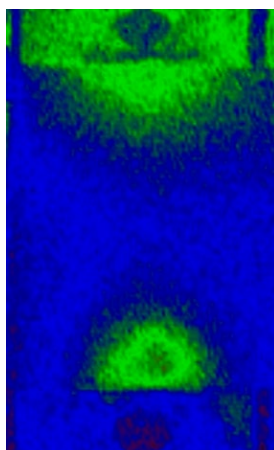
Актуальность и практическая значимость работы состоит в необходимости достоверной оценки прочности и деформативности проектируемых и возводимых конструкций, а также элементов существующих зданий, в том числе объектов культурного наследия.

Таким образом целью данной работы является построение обоснованной модели сжатия кирпичной кладки и на ее основе диаграмм деформирования каменной кладки по аналогии с моделями и диаграммами для бетона.

## 2 Materials and Methods

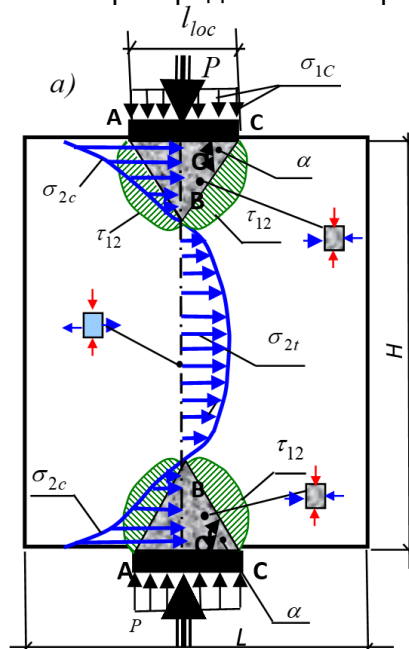
Теория сопротивления бетона сжатию базируются на рабочей гипотезе, в соответствии с которой под грузовой площадкой образуется уплотненная часть тела с гранями, наклоненными к плоскости передачи нагрузки под углом, равным углу сдвига материала образца; разрушение при местном сжатии происходит в результате непрерывного процесса преодоления сопротивления материала отрыву и сдвигу [22]-[25].

При нагружении бетонного элемента под грузовыми площадками ограниченной ширины, из-за наличия трения между грузовой площадкой и поверхностью бетона, образуются уплотненные объемы в виде клина с гранями, наклоненными к плоскости передачи нагрузки под углом, равным углу внутреннего сдвига бетона  $\alpha$ . На основе метода, которая заключается в следующем: образец подвергается циклической нагрузке, из-за гистерезисных энергопотерь зоны концентрации напряжений нагреваются гораздо сильнее, чем остальные зоны. С помощью тепловизора [25]-[29] в экспериментальных исследованиях удалось увидеть и сфотографировать эти клинья уплотнения (рис 1).



**Рис. 1 – Термограмма плоских элементов с соотношением размеров  $H/L=1.33$**   
**Fig. 1 – Thermogram of flat elements with a size ratio  $H/L=1.33$**

Внутри самого клина формируется напряженное состояние «сжатие-сжатие» ( $\sigma_{1c}; \sigma_{2c}$ ). Перемещение клина как твердого тела и его «заклинивание» окружающего бетона вызывает возникновение распора, а следовательно, раскалывающих (растягивающих) напряжений  $\sigma_{2t}$ , между вершинами клиньев уплотнения, а вдоль граней клиньев – реализуется условие чистого сдвига и вдоль граней клиньев уплотнения возникают касательные напряжения  $\tau_{12}$ . При этом в начальный момент нагружения напряжения распределяются неравномерно (рис. 2).

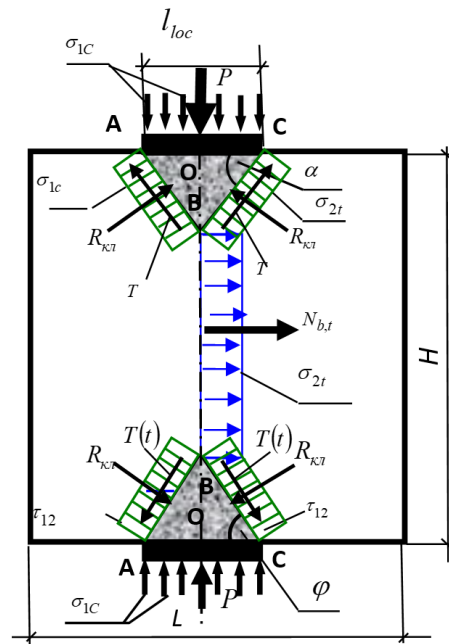


**Рис. 2 – Распределение напряжений в бетоне при местном сжатии**  
**Fig. 2 – Stress distribution in concrete under local compression**

С увеличением нагрузки происходит увеличение как значений напряжений  $\sigma_{2t}$  и  $\tau_{12}$ , которые при первом нагружении напоминали параболу, с увеличением количества циклов нагружения, из-за неупругого деформирования бетона и накопления остаточных напряжений, постепенно выравниваются и приближаются к прямоугольнику. Поэтому при расчетах эти эпюры можно принимать в виде прямоугольников с коэффициентом полноты эпюр  $\omega_i \approx 1$  [25].

Поэтому предполагается, что разрушение (рис. 3) происходит от раскалывания по вертикальной плоскости между вершинами клиньев уплотнения и сдвига по плоскости скольжения вдоль граней клиньев уплотнения. При этом разрушающая нагрузка определяется из уравнений равновесия внутренних и внешних сил для вертикального сечения и для клина в предельном состоянии [22]-[25].

$$P = \frac{N_{bt} \cos \alpha + 2T}{\sin \alpha} \quad (1)$$



**Рис. 3 – Напряженное состояние перед разрушением**  
**Fig. 3 – A tense state before destruction**

Эта теория может быть применена и для каменных кладок, что подтверждается результатами экспериментов над опытными образцами из кладок, состоящих из:

- полнотелых керамического и силикатного кирпичей, в том числе армированных стальными сварными, просечно-вытяжными и композитными сетками;
- из высокопустотных, в том числе поризованных камней;
- усиленных стальными, железобетонными и композитными обоями.

Как показывают экспериментальные исследования и в кирпичных кладках разрушение происходит от раскалывания по вертикальной плоскости между вершинами клиньев уплотнения и сдвига по плоскости скольжения вдоль граней клиньев уплотнения (рис. 4).



**Рис. 4 – Характер разрушения опытных образцов [25]**  
**Fig. 4 – The nature of the destruction of prototypes [25]**

Как видно на (рис. 4), в процессе нагружения под площадкой нагружения произошло образование клиньев уплотнения, а разрушение произошло из-за раскалывания кирпичной кладки между клиньями уплотнения и произошел сдвиг вдоль всей длины граней клиньев. Несмотря на различные конструктивные особенности, полученные результаты свидетельствуют о правомочности выдвинутой гипотезы и возможности использования теории к оценке прочности, деформативности и трещиностойкости кладок.

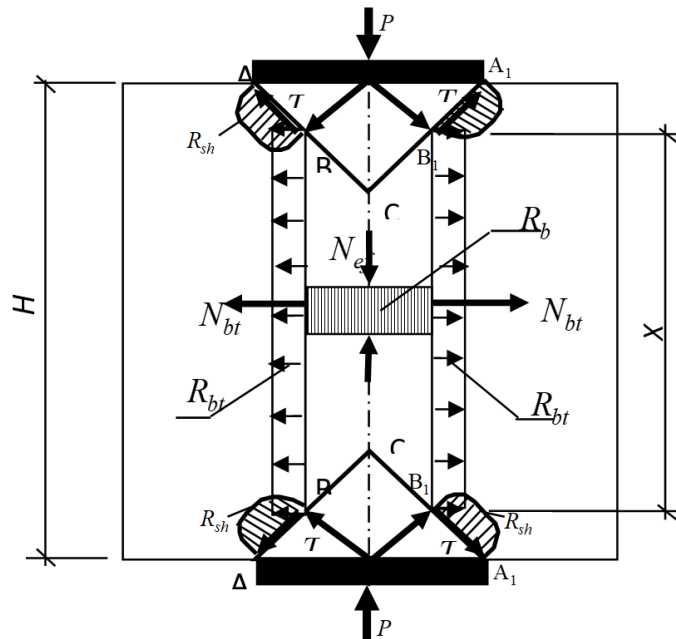
Mirsayapov I.; Antakov A.; Pavlov M.

Modeling the work of brickwork under compression;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11308. doi: 10.4123/CUBS.113.8



Только лишь при больших площади загрузки считается, что сопротивление бетонной полосы разрушению при статическом нагружении обеспечивается за счет работы бетона в трех расчетных зонах [30] и определяется различными прочностными характеристиками бетона: на сжатие  $R_b$  в ядре сечения с площадью  $A_{ef} = l_{ef} \cdot b$ , где  $l_{ef}$  – толщина плоского элемента; на растяжение  $R_{bt}$  по плоскости В – В; на сдвиг  $R_{bsh}$  по плоскости А – В (рис. 5).



**Рис. 5 – Модель разрушения бетона при широких площадках загрузки**  
**Fig. 5 – A model of concrete destruction at wide loading sites**

По аналогии с этим можно предположить, что при широких площадках загрузки в кирпичных кладках справедлива модель разрушения, указанная на (рис. 5). Поэтому она может быть применена и для каменных кладок. Эта модель базируется на рабочей гипотезе, в соответствии с которой разрушение происходит от преодоления сопротивлений материалов кладки отрыву, сдвигу и раздавливанию [31]-[34]. Это подтверждается результатами экспериментов над опытными образцами из кладок (рис. 6).



**Рис. 6 – Опытный образец в стадии разборки после испытания – «клин» в верхней приопорной зоне [15]**  
**Fig. 6 – The prototype in the disassembly stage after the test is a – "wedge" in the upper support zone [15]**

Для анализа НДС можно выделить характерные стадии работы кладки:

Mirsayapov I.; Antakov A.; Pavlov M.

Modeling the work of brickwork under compression;

2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11308. doi: 10.4123/CUBS.113.8



– стадия 1 и 1а – упругая работа материала в средней сжато-растянутой зоне между клиньями уплотнения, а при достижении предела прочности кладки на растяжение происходит образование первой трещины раскалывания по оси загрузки;

– стадия 2 – происходит развитие появившейся трещины и разделение образца на две внецентренно нагруженные половинки и каждая половинка работает как элемент с узкой площадкой загрузки (рис. 2 и 3) т.е. происходит перераспределение напряжений и усилий, образование двух клиньев по ширине площадки загрузки; в каждой половинке, в средней сжато-растянутой зоне между клиньями уплотнения напряжения растяжения достигают предела прочности кладки на растяжение (рис. 5) и происходит образование дополнительных трещин, параллельных первоначальной;

– стадия 3 – разрушение образца под действием, образовавшихся под грузовыми площадками клиновидных образований, и сопровождающееся разделением сечения на отдельные вертикальные фрагменты.

Наличие на образцах измерительного оборудования позволяет получить данные о характере распределения деформаций по мере увеличения нагрузки, которые использованы для создания методик расчёта всех исследованных видов кладок.

Для расчёта каменной кладки с широкой площадкой нагружения в стадии 3 по прочности, с учетом характера разрушения кладок, использована схема, приведённая на (рис. 5), отличающаяся от базовой для бетона, заменой соответствующих сопротивлений бетона на сопротивления материала кладки.

Условие прочности согласно теории, записывается в виде неравенства:

$$P_{ult} \leq (N_t \cos \alpha + N_{sh}) / \sin \alpha + N_{ef}, \quad (2)$$

где  $N_{ult}$  – предельное значение сжимающего усилия, действующего на конструкцию или элемент;

$N_t = R_t A_t$  – растягивающее усилие, действующее по площади поверхности/поверхностей отрыва в средней сжато-растянутой области;

$N_{sh} = R_{sh} A_{sh}$  – усилие сдвига, действующее по поверхностям клиновидных приопорных зон;

$N_{ef} = R_{ef} A_{ef}$  – сжимающее усилие, действующее в пределах ядра сжатия;

$R_t, R_{sh}, R_{ef}$  – соответственно сопротивления кладки растяжению, сдвигу и раздавливанию;

$A_t, A_{sh}, A_{ef}$  – площади растяжения, сдвига и ядра сжатия:

$$A_t = (h - l \sin \alpha \cos \alpha) b, \quad (3)$$

$$A_{sh} = l(l + \sin^2 \alpha) \cos \alpha, \quad (4)$$

$$A_{ef} = l^2 \sin^4 \alpha, \quad (5)$$

$$\alpha = \arctg(0.25R / R_t - 1.56), \quad (6)$$

где  $\alpha$  – угол наклона граней клина к поверхности грузовой площадки, определяемый в зависимости от соотношения нормативных сопротивлений материала сжатию и растяжению.

Прочность материала на сжатие из (2) выражается через соответствующие сопротивления растяжению и сдвигу при  $R \approx R_{ef}$ :

$$R = k_1 R_t \operatorname{ctg} \alpha + k_2 R_{sh} / \sin \alpha, \quad (7)$$

где  $k_1 = A_t / (A - A_{ef}), k_2 = 2A_{sh} / (A - A_{ef})$ .

**Таблица. 1 – Сопоставление расчетного и опытного значений для не армированной кладки**  
**Table. 1 – Comparison of calculated and experimental values for unreinforced masonry**

| Серия | $N_{crc}^{оп.}, кН$ | $N_{crc}^{оп.} /$ | $N_{ult}^{оп.}, кН$ | $N_{ult}^{оп.} /$ |
|-------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
|-------|---------------------|-------------------|---------------------|-------------------|



|   | по образцам       | среднее | $N_{crc}^{meop.}$ , кН | $N_{crc}^{meop.}$ | по образцам       | среднее | $N_{ult}^{meop.}$ , кН | $N_{ult}^{meop.}$ |
|---|-------------------|---------|------------------------|-------------------|-------------------|---------|------------------------|-------------------|
| 1 | 247<br>274<br>250 | 257     | 233                    | 1.10              | 410<br>423<br>436 | 423     | 382                    | 1.13              |
| 2 | 355<br>360<br>380 | 365     | 348                    | 105               | 600<br>654<br>648 | 634     | 571                    | 1.11              |
| 3 | 372<br>335<br>345 | 351     | 309                    | 1.14              | 630<br>668<br>676 | 658     | 627                    | 1.05              |
| 4 | 360<br>370<br>300 | 343     | 305                    | 1.125             | 800<br>825<br>705 | 776     | 712                    | 1.09              |
| 5 | 420<br>480<br>465 | 455     | 428                    | 1.06              | 690<br>730<br>700 | 706     | 614                    | 1.15              |

Серия 1 – опытные образцы сечением 380\*250 мм из полнотелого керамического кирпича и раствора М125 и М50 соответственно.

Серия 2 – опытные образцы сечением 380\*250 мм из полнотелого керамического кирпича и раствора М125 и М100 соответственно.

Серия 3 – опытные образцы сечением 380\*250 мм из полнотелого силикатного кирпича и раствора М125 и М75 соответственно.

Серия 4 – опытные образцы сечением 380\*250 мм из пустотелых керамических камней 2NF и раствора М125 и М75 соответственно.

Серия 5 – опытные образцы сечением 380\*250 мм из пустотелого керамического кирпича 1.4NF и раствора М125 и М100 соответственно.

### 3 Results and Discussion

В работе по аналогии алгоритмом построения диаграмм деформирования бетона сжатию описан алгоритм построения диаграмм деформирования материалов сжатого элемента из каменной кладки в характерных напряженных зонах с учетом особенностей стадий НДС, последовательно протекающих по мере увеличения внешней нагрузки. Совмещенные в части приведения величин относительных деформаций диаграммы деформирования приведены на (рис. 2, 3, 5). Ниже изложены предложения по расчёту каменных кладок с использованием диаграмм деформирования, новизна которых подтверждается отсутствием их в литературе, и позволяющих оценить работоспособность кладок на всех стадиях их работы по мере увеличения внешней нагрузки от нуля до разрушения. Для анализа НДС сжатых элементов из каменной кладки и формирования аналитических зависимостей рассматриваются характерные стадии: упругая работа, появление и развитие трещин, разрушение. Выражение (7) позволяет получить расчётную величину сопротивления кладки сдвигу после следующего преобразования:

$$R_{sh} = (R \sin \alpha - k_1 R_t \cos \alpha) / k_2, \quad (8)$$

Если выражение (7-10) записать через напряжения – это позволит рассматривать не только стадию разрушения элемента, но и промежуточные этапы его нагружения:

$$\sigma = k_1 \sigma_t \operatorname{ctg} \alpha + k_2 \tau / \sin \alpha, \quad (9)$$

Полученное выражение (9) записывается через соответствующие деформации:

$$\varepsilon E = k_1 \varepsilon_t E_t \operatorname{ctg} \alpha + k_2 \gamma G / \sin \alpha, \quad (10)$$

С учетом известных соотношений:  $E = 0.5E_0$ ,  $G = 0.4E_0$ , равенство (10) преобразуется следующим образом:



$$\varepsilon = 0.5k_1\varepsilon_t \operatorname{ctg} \alpha + 0.4k_2\gamma / \sin \alpha. \quad (11)$$

Из равенства (11) зная относительные деформации материала кладки при сжатии и растяжении можно определить относительные деформации при сдвиге:

$$\gamma = [(\varepsilon - 0.5k_1\varepsilon_t \operatorname{ctg} \alpha) \sin \alpha] / 0.4k_2. \quad (12)$$

Подставляя сдвиговые деформации в выражение  $\tau = G\gamma \approx 0.4E\gamma$ , получаем искомую диаграмму « $\tau - \gamma$ » (рис. 4). При этом следует учитывать существенную разницу в значениях предельных деформаций кладки при сжатии и растяжении. Следствием этого является то, что при испытаниях образцов на сжатие появляются вертикальные трещины, свидетельствующие об исчерпании сопротивления кладки растяжению. В этом случае в условии (12) с определённого уровня нагружения растягивающие деформации  $\varepsilon_t$  следует исключить – далее поперечное расширение образца будет происходить за счёт раскрытия вертикальных трещин, а в момент непосредственно перед образованием этих трещин условие (12) будет иметь вид:

$$\gamma = [(\varepsilon_1 - 0.5k_1\varepsilon_{t,2} \operatorname{ctg} \alpha) \sin \alpha] / 0.4k_2, \tau = 0.4E\gamma_1, \quad (13)$$

где  $\varepsilon_{t,2}$  – предельные деформации кладки при растяжении;

$\varepsilon_1$  – граница упругой стадии работы сжатой кладки.

Значение  $\gamma_1$  в выражении (13) является абсциссой первой из параметрических точек на диаграмме « $\tau - \gamma$ ».

Вторая параметрическая точка определяется при условии  $\varepsilon = R/E$  и  $\varepsilon_t = 0$  – растянутый материал кладки выключен из работы, а поперечное расширение образца происходит за счёт раскрытия вертикальных трещин. При этом касательные напряжения достигают максимального значения:

$$\gamma_0 = (\varepsilon_0 \sin \alpha) / 0.4k_2, \tau_0 = R_{sh}. \quad (14)$$

Третья параметрическая точка соответствует предельным деформациям сжатой кладки и по аналогии с предыдущим выражением (14) будет определяться следующими координатами:

$$\gamma_2 = (\varepsilon_2 \sin \alpha) / 0.4k_2, \tau_0 = \tau_2 = R_{sh}. \quad (15)$$

При дальнейшем увеличении нагрузки полагаем, что сопротивление кладки сдвигу не преодолено и продолжает работать сжатое ядро.

Проверка полученных расчётных выражений проведена по результатам и с учетом испытаний многочисленных опытных образцов. Общий вид опытных образцов, изготовленных из различных материалов и подготовленных к испытаниям, приведен на (рис. 4). Типичный характер образования, развития трещин показан на (рис. 6), из которого можно увидеть их соответствие расчётной схеме и гипотезе о механизме разрушения.

Для построения диаграмм деформирования каменной кладки при сжатии, растяжении и сдвиге деформации растяжения и сдвига выразим через деформации сжатия:  $\varepsilon_t = \mu\varepsilon \approx 0.2\varepsilon, \gamma = (\varepsilon \sin \alpha) / 0.4k_2$ . Графические зависимости, полученные при обработке данных испытаний образцов из полнотелого керамического кирпича марки М125 и раствора марки М50 приведены на (рис. 7–8). Выделены три характерных области:

I – область совместной работы материала в зонах отрыва, сдвига и раздавливания;

II – область выключения зоны отрыва из работы и дальнейшего совместного сопротивления сжатию зон сдвига и раздавливания;

III – область выключения зоны сдвига из работы и дальнейшего сопротивления сжатию только зоны раздавливания.

На (рис. 7) видны характерные особенности работы материала кладки в напряженных зонах сжатого элемента:

– область I соответствует стадиям 1, 1а (рис. 2): упругая работа, достижение предела упругости  $\varepsilon_{t,1}, \gamma_1$ , начало неупругих деформаций в зонах растяжения и сдвига, появление трещины отрыва –  $\varepsilon_{t,0}, \varepsilon_{t,0}$ ;

– область II иллюстрирует протекающие процессы стадии 2 (рис. 5): появление и развитие новых трещин  $\varepsilon_{t,0} \rightarrow \varepsilon_{t,2}$ , развитие неупругих деформаций  $\varepsilon_1 \rightarrow \varepsilon_0, \gamma_1 \rightarrow \gamma_0$ ;

– область III описывает механизмы разрушения: деформации сдвига и сжатия достигают предельных значений  $\gamma_2, \varepsilon_2$ . Кроме того, для диаграммы сдвига 3 после достижения деформаций  $\gamma = \gamma_2$  пунктирный участок характеризует работу сил трения и зацепления поверхностей наклонных площадок.

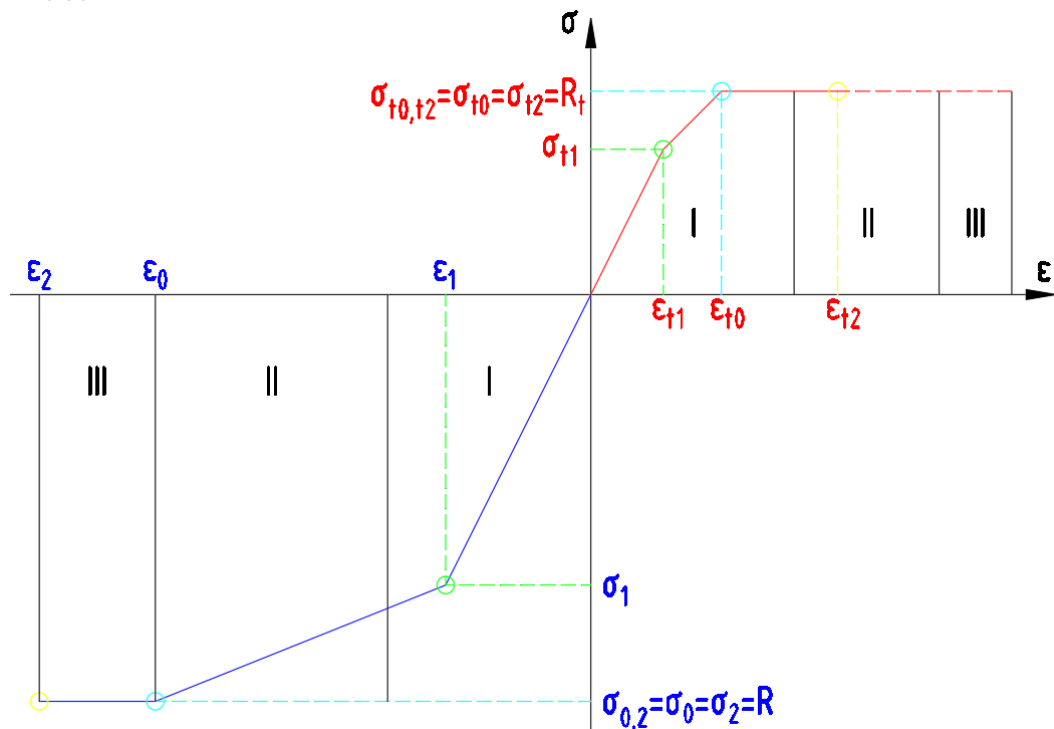


Рис. 7 – Диаграмма деформирования каменной кладки «сжатие-растяжение»  
Fig. 7 – Masonry deformation diagram "compression-stretching"

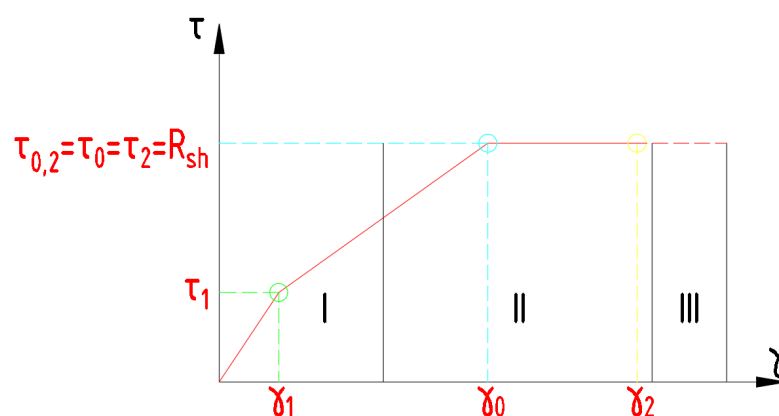
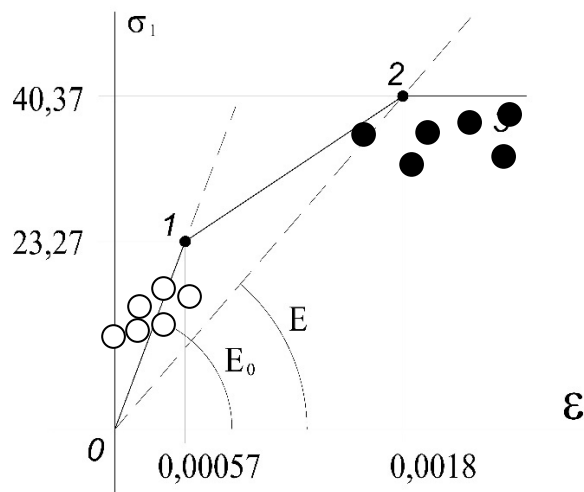


Рис. 8 – Диаграмма деформирования каменной кладки «сдвиг»  
Fig. 8 – Masonry deformation diagram "shift"



Опытные точки: ○ – образование трещины; ● - разрушение.

Рис. 9 – Теоретическая диаграмма деформирования кладки при сжатии  
Fig. 9 – Theoretical diagram of deformation of the load under compression

## 4 Conclusions

Деформативность кладки является одним из ответственных свойств, обеспечивающих эксплуатационную пригодность несущих конструкций зданий и сооружений, что отмечается многочисленными исследованиями ученых. Наличие полученных диаграмм деформирования позволяет оценить осевую и сдвиговую податливость реальных конструкций. Для этого статический расчёт следует проводить в несколько этапов, определяя наиболее нагруженные участки конструкции и их элементов, сравнивая расчетные величины деформаций с предельными значениями. Данная методика оценки напряженно-деформированного состояния материала каменных кладок сжатых конструкций и элементов является принципиально новой по отношению к существующим и может быть предложена для внедрения в нормы проектирования.

На основе приведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Описанная теория показывает удовлетворительную степень совпадения в сравнении с экспериментальными данными опытных образцов, в том числе и других авторов.
2. Построены и обоснованы теоретические основы методики расчета сжатых каменных элементов на основе физической модели.
3. Описаны специфические особенности НДС разномодульных сред в диапазоне внешних нагрузок от 0 до разрушающих с использованием диаграмм деформирования материалов.

## 5 Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interest. The authors made equivalent contributions to the publication.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

## References

1. Onishchik L.V. (1939) Stone structures of industrial and civil buildings. Moscow. 208 p <https://search.rsl.ru/ru/record/01005197140>
  2. Geniev G.A. (1979) On the criteria for the strength of masonry in a flat stressed state. *Construction mechanics and calculation of structures*, 2, 7-11 <https://elibrary.ru/item.asp?id=36892937>
  3. Lazouski D.N., Khatkevich A.M. (2022) Deformation approach to the calculation of compression resistance of reinforced stone elements. *Vestnik MGSU*, 17 (12), 1638-1652
- Mirsayapov I.; Antakov A.; Pavlov M.  
Modeling the work of brickwork under compression;  
2024; *Construction of Unique Buildings and Structures*; 113 Article No 11308. doi: 10.4123/CUBS.113.8



<https://www.doi.org/10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652>

4. Lazouski D.N., Khatkevich A.M. (2017) Calculation of resistance to compression of masonry and reinforced masonry elements taking into account physical non-linearity. *Vestnik of the Polotsk State University*, **16**, 41-50 <https://elibrary.ru/item.asp?id=32778049>

5. Khatkevich A.M. (2014) The method of calculating the strength of normal sections to the longitudinal axis of the construction of masonry with regard deformation diagram. *Vestnik of the Polotsk State University*, **8**, 45-53 <https://elibrary.ru/item.asp?id=23278808>

6. Naumov A.E. (2010) A local approach to determining the stress-strain state of centrally compressed brickwork. *Vestnik Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, **1**, 97-101 <https://elibrary.ru/item.asp?id=20777724>

7. Naumov A.E. (2010) The strength of the centrally compressed masonry, taking into account technological factors: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 05.23.01. Belgorod. p. 168 <https://elibrary.ru/item.asp?id=19227393>

8. Artyushin D.V., Shumikhina V.A. (2015) Experimental and analytical researches of resistance to compression of masonry. *Regional architecture and construction*, **3 (24)**, 62-67 <https://elibrary.ru/uxrsdd>

9. Plotnikov A.N. (2017) Calculation of masonry for central compression as a quasi-homogeneous continuous elastic plastic body. *Vestnik Chuvash State Pedagogical University named after I.Ya. Yakovlev. series: mechanics of the limit state*, **4 (34)**, 30-35 <https://elibrary.ru/item.asp?id=32855748>

10. Likhachyova S.Yu., Pozdeev M.L., Smagin I.V. (2021) Comparative analysis of phenomenological criteria of stone masonry strength at biaxial compression. *Volga scientific journal*, **4 (60)**, 40-47 <https://elibrary.ru/item.asp?id=47565210>

11. Likhachyova S.Yu., Pozdeev M.L. (2023) Calculation of approximating curve parameters of masonry compression diagram. *Volga scientific journal*, **3 (67)**, 34-41 <https://elibrary.ru/item.asp?id=54633285>

12. Donchenko O.M., Degtev I.A., Tarasenko V.N. (2017) The most important role of the mortar component in the resistance of masonry to force compression. *Vestnik Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*, **9**, 43-46 [https://doi.org/10.12737/article\\_59a93b08ccf406.05266017](https://doi.org/10.12737/article_59a93b08ccf406.05266017)

13. Bedov Anatoliy I., Gabitov Azat I., Gallyamov Azat A., Salov Aleksandr S., Gaisin Askar M. (2017) Application of computer simulation in the evaluation of the stress-strain state of load-bearing structures of buildings masonry. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, **13 (1)**, 42-49 <https://elibrary.ru/item.asp?id=29366788>

14. Benedetti A., Tarozzi M. (2022) Compressive strength of heterogeneous masonry walls containing blends of brick types. *Materials and Structures*, **55 (71)**, 1-17 <https://doi.org/10.1617/s11527-022-01912-0>

15. Deepa A. Joshi, R.K. Jain (2013) Evaluation of Compressive Strength and Basic Compressive Stress of Clay Brick Unreinforced Masonry by Prism Test. *International Journal of Science and Research*, **4 (5)**, 913-916 <https://www.ijsr.net/archive/v4i5/SUB154258.pdf>

16. K. Madhavi, Renuka Devi M.V., K.S. Jagadish (2017) Split Tensile Strength of Brick Masonry. *International Journal of Civil Engineering*, **6 (6)**, 1-8 [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3091591](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3091591)

17. I Khan, M. Ashraf, M. Fahim (2021) Experimental characterization of brick masonry for lateral strength evaluation. *Magazine of Civil Engineering*, 104 (4) <https://doi.org/10.34910/MCE.104.9>

18. Mariateresa Guadagnuolo, Marianna Aurilio, Andrea Basile, Giuseppe Faella (2020) Modulus of Elasticity and Compressive Strength of Tuff Masonry: Results of a Wide Set of Flat-Jack Tests. *Building*, **10 (5)** <https://doi.org/10.3390/buildings10050084>

19. Tianxiang Pi, Zhongheng Du, Huchen Zhang, Sicheng Wang (2021) Experimental Study on Basic Mechanical Properties of Core-Column Non-mortar Aerated Concrete Block Masonry. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, **15 (18)**, 1-18 <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00455-y>

20. SP 15.13330.2020. Stone and reinforced stone constructions. <https://www.minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/a70/SP-15.pdf>

21. Eurocode 6: Design of masonry structures. <https://eurocodes.jrc.ec.europa.eu/EN-Eurocodes/eurocode-6-design-masonry-structures?id=136>

22. Rokhlin I.A. (1977) Research of resistance to deformation and destruction of structural elements made of concrete and stone materials: dissertation for the degree of Doctor of Technical



Sciences: 05.23.01. Kiev. p. 432 <https://search.rsl.ru/ru/record/01009029638>

23. Zalesov A.C. (1989) Strength and crack resistance of short reinforced concrete elements. Kazan. P. 97 <https://search.rsl.ru/ru/record/01001500727>

24. Starchevsky A. V. (1987) Stress-strain state and calculation of reinforced concrete wall beams according to limit states under the action of concentrated loads: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences: 01.02.03. Moscow. p. 191 <https://search.rsl.ru/ru/record/01008554477>

25. Mirsayapov II.T. (2018) Development of the scientific foundations of the theory of endurance of reinforced concrete structures under the combined action of bending moments and transverse forces: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences: 05.23.01. Moscow. p. 394 <https://elibrary.ru/zbynzq>

26. Mirsayapov II.T. (2010) Detection of stress concentration regions in cyclic loading by the heat monitoring method. *Mechanics of Solids*, **45** (1), 133-139 <https://www.doi.org/10.3103/S0025654410010164>

27. Mirsayapov II.T. (2009) A study of stress concentration zones under cyclic loading by thermal imaging method. *Strength of Materials*, **41** (3), 339-344 <https://www.doi.org/10.1007/s11223-009-9121-8>

28. Mirsayapov II.T., Apkhadze G.T., Simakov V.D. (2023) Numerical analysis of nonlinear behavior of reinforced concrete structures on solid models. Monograph. *Kazan State University of Architecture and Engineering*, 211 p. <https://elibrary.ru/fwgpiq>

29. Mirsayapov II.T. (2007) Identification of stress concentration zones in reinforced concrete structures under repeated loading. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*, **6**, 16-18 <https://elibrary.ru/item.asp?id=9603481>

30. Sokolov B.S. (2011) Theory of force resistance of anisotropic compression materials and its practical application. Moscow p. 160 <https://search.rsl.ru/ru/record/02000011175>

31. Sokolov B.S., Antakov A.B. (2014) The results of masonry and reinforced masonry research. *Vestnik MGSU*, **3**, 99-106 <https://elibrary.ru/item.asp?id=21336828>

32. Sokolov B.S., Antakov A.B. (2014) New approach to calculation of stone layings. *News KGASU*, **3** (29), 75-81 <https://elibrary.ru/item.asp?id=22076420>

33. Sokolov B.S., Antakov A.B. (2019) Analytical assessment of the stress-strain state of stone masonry under compression on the basis of the author's theory. *Building materials*, **9**, 51-55 <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55>

34. Sokolov B.S., Antakov A.B. (2018) Strength, rigidity and crack resistance of compressed stone and reinforced stone masonry. Kazan. p. 170 <https://search.rsl.ru/ru/record/01009579630>

35. Kabantsev O.V. (2013) Deformation properties of masonry as a piecewise homogeneous medium for elastoplastic strain analysis. *Earthquake Engineering. Constructions Safety*, **4**, 36-40 <https://elibrary.ru/item.asp?id=20229281>

36. Kashevarova G.G., Ivanov M.L. (2012) Natural and numerical experiments aimed at building the stress-strain brickwork. *Volga scientific journal*, **8**, 10-15 <https://elibrary.ru/item.asp?id=17923985>

37. Kopanitsa D.G., Kabantsev O.V., Useinov E.S. (2012) Experimental investigations of the masonry fragments to the action of static and dynamic loads. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta*, **4** (37), 157-178 <https://elibrary.ru/item.asp?id=18241830>