



Алгоритмы построения моделей каменных конструкций для решения частных задач

А.Б. Антаков¹, И.Т. Мирсаяпов¹

¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет
г. Казань, Российская Федерация

Аннотация. На современном этапе развития отрасли существует множество технических и технологических решений каменных кладок, применяемых для возведения широкого спектра строительных конструкций. Кладка, представляющая собой композитный материал с регулярной структурой и разномодульными включениями, находится в сложном напряженном состоянии, зависящем от множества факторов: от особенностей составляющих ее материалов и качества производства работ по ее возведению до специфики распределения усилий в объеме конструкции. В тоже время расчеты каменных, армокаменных конструкций производятся с использованием методик, полученных в XX веке на основе гипотезы плоских сечений и не отражающих характерные особенности напряженно-деформированного состояния кладок, как структурно неоднородного композита. Целью исследований является описание напряженно-деформированного состояния каменных конструкций на различных стадиях нагружений с позиций теории силового сопротивления анизотропных материалов при сжатии. В перечень задач входят построение расчетных схем на основе проведенных комплексных исследований, включающих компьютерное моделирование и значительный объем экспериментов на опытных образцах, отражение выявленных специфических особенностей каменных кладок в математических зависимостях расчетного аппарата теории. В результате сформулированы принципы построения моделей и критериев прочности для решения частных задач, включающих различные случаи конструктивных решений и напряженно-деформированного состояния с использованием диаграммного метода.

Ключевые слова: каменная кладка, прочность, модель, диаграммы деформирования, расчет, напряжение, деформация, конструкции.

Для цитирования: Антаков А.Б., Мирсаяпов И.Т. Алгоритмы построения моделей каменных конструкций для решения частных задач // Известия КГАСУ, 2026, № 2 (76), с. 428-443, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.29, EDN: ZWUKUE

Algorithms for developing models of stone structures for solving particular problems

A.B. Antakov¹, I.T. Mirsayapov¹

¹Kazan State University of Architecture and Engineering
Kazan, Russian Federation

Abstract. At the present stage of development of the industry, there are many technical and technological solutions for masonry used for the construction of a wide range of building structures. Masonry, which is a composite material with a regular structure and miscellaneous inclusions, is in a complex stressed state, depending on many factors: starting from the characteristic features of its constituent materials and the quality of work on its construction to the specifics of the distribution of forces in the volume of the structure. At the same time, calculations of stone and reinforced stone structures are made using methods obtained in the XX

century on the basis of the hypothesis of flat sections which doesn't reflect the characteristic features of the stressed-deformed state of masonry, as a structurally heterogeneous composite. The aim of the authors' research is to describe the stress-strain state of stone structures at various stages of loading from the standpoint of the theory of the force resistance of anisotropic materials under compression. The list of tasks includes the development of calculation schemes based on complex studies, including computer modeling and a significant amount of experiments on prototypes, reflection of the identified specific features of masonry in the mathematical relationships of the theory calculation apparatus. As a result, the principles of developing models and strength criteria for solving particular problems, including various cases of structural solutions and stress-strain state using the diagram method, are formulated.

Keywords: masonry, strength, model, strain diagrams, calculation, stress, strain, structures.

For citation: Antakov A.B., Mirsayapov I.T. Algorithms for developing models of stone structures for solving particular problems // News of KSUAE, 2026, № 2 (76), p. 428-443, DOI: 10.48612/NewsKSUAE/76.29, EDN: ZWUKUE

1. Введение

Кладка, представляющая собой композитный материал с регулярной структурой и разномодульными включениями, находится в сложном напряженном состоянии, зависящем от множества факторов: от особенностей составляющих ее материалов и качества производства работ по ее возведению до специфики распределения усилий в объеме конструкции. В тоже время расчеты каменных, армокаменных конструкций и их усиление выполняется на основе эмпирических методик и зависимостей, полученных в XX веке на основе гипотезы плоских сечений и не отражающих специфические особенности напряженно-деформированного состояния кладок, как структурно неоднородного композита.

Анализ работ ученых показал наличие ряда подходов к оценке напряженно-деформированного состояния каменных кладок, в том числе трансформированных теоретических основ и методик области исследований бетона и железобетона:

- теория силового сопротивления анизотропных материалов сжатию Соколова Б.С. [1, 2], представляющая собой обобщенный критерий прочности в сочетании с диаграммным методом применяемый для оценки напряженно-деформированного состояния (далее НДС) бетонных, железобетонных и каменных конструкций. Авторы занимаются вопросами прочности, трещиностойкости и деформативности каменных и армокаменных кладок на основе положений теории силового сопротивления анизотропных материалов сжатию, которая разработана проф. Соколовым Б.С. в 1980-е годы и представляет собой подход к оценке прочности бетонных и железобетонных конструкций [1]. Исследования авторов, включающие физические эксперименты, компьютерное моделирование и теоретические обобщения, показали качественное соответствие особенностей напряженного состояния сжатых бетонных и каменных конструкций, а также возможность применения диаграммного метода для комплексной оценки НДС. За более чем двадцатилетний период исследований в области обозначенной тематики проведены испытания более 150 опытных образцов каменных кладок из различной размерности от 1НФ до 14,3НФ керамических кирпичей и камней, силикатных кирпичей 1,4НФ с кладочными растворами марочных прочностей от М40 до М100. В том числе испытаны выделенные серии образцов с сетчатым армированием и усиленные стальными, железобетонными и штукатурными обоями. При изготовлении образцов использовались кладочные стальные и композитные сетки различных производителей и видов. В ходе испытаний производились замеры продольных и поперечных деформаций, фиксация качественных и количественных повреждений, возникающих в процессе нагружения и значений трещинообразующих, разрушающих усилий, создаваемых прессом ИПС-1. Параллельно проводились исследования методами компьютерного моделирования с применением программных комплексов «ЛИРА» и «Ansys» для изучения напряженно-деформированного состояния компонентов кладки при сжатии в характерных областях и специфических эффектов, связанных геометрическими

параметрами разномодульных включений, наличием пустот в кирпичах или камнях, введением в состав моделей конечных элементов, моделирующих сетки или обоймы. На основе анализа полученного массива данных сформулированы принципы построения плоских и объемных расчетных схем, адекватно отражающих фактическое напряженно-деформированное состояние сжатых элементов на различных стадиях. Графические интерпретации достоверно отражают механику работы сжатого элемента, а математический аппарат позволяет учитывать конструктивные особенности кладок, геометрические и физико-механические параметры составляющих конструкцию изделий и материалов;

- эмпирические зависимости Боме, Говве, Крейгера, Графа, Онищика Л.И. и других [3-5], полученные в первой половине XX века на основе обработки экспериментальных данных. Эти исследования заложили основы научных направлений к области каменных кладок и нормативных методик расчета СССР и других стран в начале и первой половине XX века;

- традиционные критерии прочности Мора-Кулона, Друкера-Прагера на основе классических теорий [6];

- методы микро- и макро моделирования соответственно с дискретизацией либо гомогенизацией свойств каменной кладки, как композитного материала с приведенными анизотропными свойствами Р.В. Lourenço, А.В. Page и других [5, 9]. В результате были сформированы принципы формирования компьютерных моделей конструкций, находящихся преимущественно в условиях плоского напряженного состояния, определены диапазоны расчетных параметров, позволяющих получать удовлетворительные сходимости результатов моделирования с экспериментальными данными;

- деформационная теория пластичности, оперирующая моделями нелинейно-упругого тела [9, 10];

- частные модели с использованием каркасно-стержневых аналогов и критериев прочности Барановой Т.И., Ласькова Н.Н., Наумова А.Е., Артюшина Д.В. и др. [6]. Разработаны основы оценки прочности материала кладки характерных зон стеновых конструкций в условиях плоского напряженного состояния. Выделены критерии прочности материалов сжатой, растянутой зон и наклонных силовых потоков между грузовыми площадками и опорами;

- критерии прочности, условно разделяемые на полиномиальные Мизеса, Хилла, Тцай-Ву, Хоффмана, феноменологические критерии Pela, Ghiassi, Dhanasekar, Berto и частные критерии по виду разрушения Кашеваровой Г.Г., Кабанцева О.В., Комохова П.Г., Беленцова Ю.А., Лихачевой С.Ю., в том числе при одноосных, плоских и объемных напряженных состояниях [6, 7, 9]. Результаты исследований перечисленных авторов дополнили базу научных данных в области подходов к оценке прочности и деформативности каменных кладок, в том числе частных случаев нагружений;

- частные модели на основе репрезентативных элементарных объемов структурно неоднородной каменной кладки [7, 8, 11]. Исследования направлены на создание цифровых моделей минимального объема, максимально адекватно описывающих свойства кладки в ходе макро моделирования методами МКЭ (метод конечных элементов) в масштабах реальных конструкций с использованием современных программных комплексов;

- изотропные модели для деформационных расчетов ортотропных материалов Betten J., Car E., Oller S. [10]. Разработаны алгоритмы формирования упрощенных моделей каменной кладки без учета анизотропии материала для экспресс-оценки НДС (напряженно-деформированного состояния);

- исследования в области компьютерного моделирования каменных кладок, начатые Р.В. Lourenço, Page A.W. и другими, продолжаются исследователями [13-15] в части уточнений исходных параметров расчетных моделей на основе пополняющейся базы экспериментальных исследований. Работы авторов [16-17] связаны с поиском наиболее адекватных математических функций и граничных условий для описания структуры каменной кладки и цементно-песчаного раствора при сложных напряженных состояниях.

Не смотря на некоторые полемические разногласия в подходах, терминах и трактовках явлений [18], анализ перечисленных подходов и теоретических основ позволил 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, особенностей конструктивного решения и различного рода несовершенств – вариативность физико-механических свойств и качества заполнения растворных швов, собственные дефекты кирпича;
- в сжатых конструкциях и элементах при отношении модулей $E_k/E_p > 1$ 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 растяжению и сдвигу;
- наиболее достоверно НДС элементов и конструкций из каменных кладок описывается экспериментальными диаграммами деформирования. Теоретические построения с использованием эмпирических нормативных методик, в том числе зарубежных, относительно точны для стадий упругой стадии работы и трещинообразования кладки из традиционных для периода разработки указанных норм проектирования материалов.

Цель исследования состоит в аналитическом описании с позиций теории силового сопротивления анизотропных материалов сжатию и известными соотношениями физико-механических параметров напряженно-деформированного состояния частных случаев нагружения конструкций и элементов из каменной кладки.

В перечень задач входит:

- рассмотрение стадий НДС сжатых элементов из каменной кладки, в том числе в условиях сложных напряженных состояний, на основе анализа результатов экспериментальных исследований с построением графических интерпретаций расчетных схем или моделей;
- аналитическое описание расчетных моделей с учетом экспериментально выявленных эффектов и использованием математического инструментария теории, известных соотношений механики деформирования.

2. Материалы и методы

В ранее опубликованных работах [2, 19] приведены результаты исследований и описание аналитических методик построения диаграмм деформирования материалов элемента из каменной кладки при осевом сжатии, в том числе с сетчатым армированием или усилением обоями различных видов, включая напрягаемые (рис. 1, 2).

Область применения указанных методик может быть существенно расширена, в том числе для описания различных случаев местного действия нагрузки, внецентренно сжатых конструкций из различных материалов и изделий (рис. 3). Для этого следует использовать обобщенный и адаптивный алгоритм, предполагающий рассмотрение следующих аспектов какой-либо частной задачи:

- геометрические параметры конструкции и составляющих ее изделий – кирпича или камней для оценки степени гомогенности и, как следствие, понимания какие физико-механические характеристики материалов кладки использовать при расчетах. Например, при относительно компактных размерах поперечного сечения столба, простенка или стены из крупноформатных камней и малой объемной доле растворной составляющей сопротивления растяжению и сдвигу следует принимать соответствующими параметрам камня. Массивные конструкции из мелкоштучных кирпича или камней размерностями 1НФ-2,1НФ с максимальной объемной долей кладочного раствора следует рассматривать с учетом его влияния на приведенные сопротивления кладки;
- конструктивные особенности кладки – вид перевязки;

- отсутствие или наличие повреждений. Подразумевается наличие вертикальных трещин в сжато-растянутой зоне или наклонных в приопорных областях, свидетельствующих о соответствии напряженного состояния второй стадии НДС и снижении прочностного потенциала кладки в восприятии соответственно растягивающих и сдвигающих напряжений;

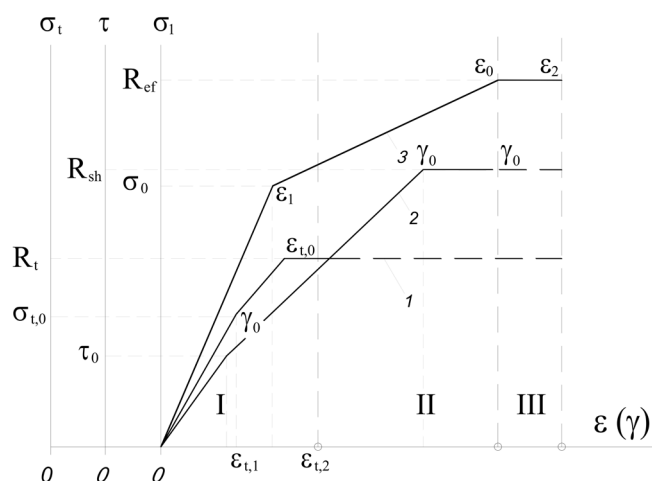


Рис. 1. Диаграммы деформирования: 1, 2, 3 – теоретические зависимости « $\sigma_t - \varepsilon_t$ », « $\tau - \gamma$ », « $\sigma - \varepsilon$ »; I, II, III – области характерной работы сжатого элемента на различных этапах нагружения.
(иллюстрация авторов)

Fig. 1. Deformation diagrams: 1, 2, 3 - theoretical dependencies « $\sigma_t - \varepsilon_t$ », « $\tau - \gamma$ », « $\sigma - \varepsilon$ »; I, II, III - areas of characteristic operation of the compressed element at various stages of loading.
(illustration by the authors)

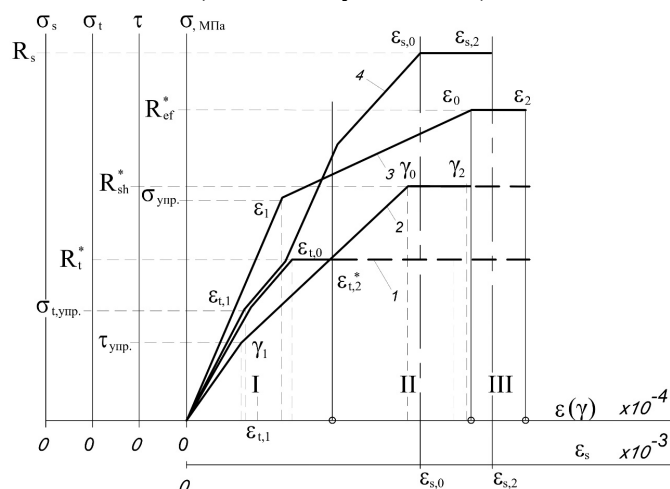


Рис. 2. Совмещенные диаграммы деформирования:
1, 2, 3, 4 – теоретические зависимости « $\sigma_t - \varepsilon_t$ », « $\tau - \gamma$ », « $\sigma - \varepsilon$ », « $\sigma_s - \varepsilon_s$ »;
I, II, III – области характерной работы сжатого элемента с сетчатым армированием
(иллюстрация авторов)

Fig.2. Combined deformation diagrams:
1, 2, 3, 4 - theoretical dependencies « $\sigma_t - \varepsilon_t$ », « $\tau - \gamma$ », « $\sigma - \varepsilon$ », « $\sigma_s - \varepsilon_s$ »;
I, II, III - areas of characteristic operation of a compressed element with mesh reinforcement
(illustration by the authors)

- наличие армирующих элементов, интенсивность армирования - μ . В качестве армирующих элементов подразумеваются кладочные сетки из различных материалов – стальные, композитные жесткие или тканые. Кроме того, могут рассматриваться элементы усиления – вклеиваемые стальные или композитные стержни либо резьбовые шпильки, напрягаемые в ходе монтажа. Учет наличия армирующих элементов позволяет вычислять и использовать приведенные сопротивления кладки растяжению и сдвигу;

- наличие элементов усиления – обойм. Параметры элементов обойм - площади сечений и шаг хомутов, позволяющие определить интенсивность армирования, подобно вариантам с кладочными сетками;

- наличие преднапряженных элементов обойм, стесняющих поперечные деформации кладки. Напряжения, создаваемые преднапряженными хомутами монтируемых в ходе усиления конструкций обойм, регулируемо компенсируют или снижают величины растягивающих усилий N_t в поперечных сечениях и сдвигающих N_{sh} в приопорных областях;

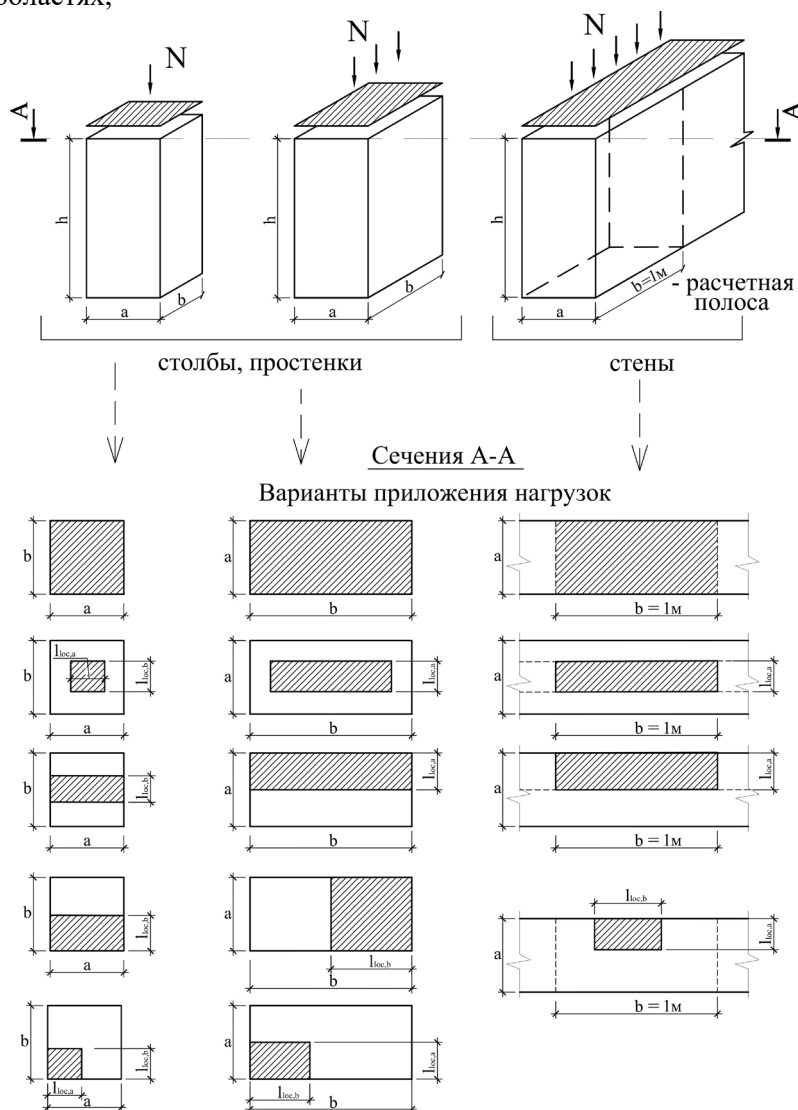


Рис. 3. Варианты приложения нагрузок на столбы, простенки и стены (иллюстрация авторов)
Fig. 3. Options for applying loads to posts, partitions and walls (illustration by the authors)

- физико-механические параметры составляющих конструкцию материалов и изделий, в том числе армирующих и усиливающих элементов. При этом следует определиться какого рода ставятся задачи – проектирование вновь возводимой или усиливаемой конструкции с учетом нормативно установленных коэффициентов надежности либо исследовательские задачи с изучением предельных состояний и, соответственно, использованием в расчетах пределов прочности;

- воспринимаемые конструкцией усилия и граничные условия их передачи. Подразумевается анализ и классификация действующих усилий относительно структуры кладки. Например, равномерное сжатие при осевом приложении внешнего усилия, внецентренное сжатие или местное действие нагрузки в различных вариантах. Применительно к случаям местного действия нагрузки при осевом и внецентренном приложении усилий производится трансформация ранее опубликованных расчетных схем

сжатых элементов, отображающих стадии НДС [1,2]. Модели для осевого нагружения приведены для случаев отсутствия и наличия сетчатого армирования (рис. 4, 5). Процессы, происходящие в кладке сжатого неармированного элемента при осевом местном действии нагрузки, имеют схожий качественный характер стадий НДС с ранее опубликованными для случаев нагружения по всей площади сечения в диапазоне значений отношения l_{loc}/l от 0,3 до 1,0. Случаи решений с передачей нагрузок на кладку с меньшими величинами l_{loc}/l для каменных конструкций не характерны, но могут быть учтены адаптацией расчетных выражений введением соответствующих обойменных напряжений, создаваемых массивом кладки окружающим зону нагружения.

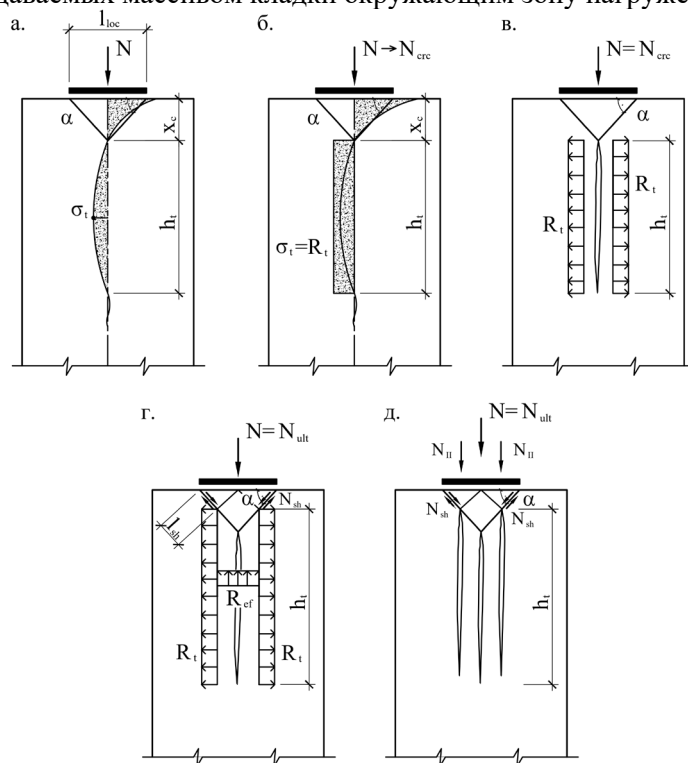


Рис. 4. Стадии напряженно-деформированного состояния конструкции при осевом приложении сжимающей нагрузки: а) стадия упругой работы; б) достижение предела прочности на растяжение; в, г) трещинообразование; д) разрушение (иллюстрация авторов)

Fig. 4. Stages of stress-strain state of the structure at axial application of compressive load

а) elastic work stage; б) achievement of ultimate tensile strength;

в, г) cracking; д) destruction (illustration by the authors)

Местное действие нагрузки в отношении армированного элемента вызывает процессы также ранее описанные с возможностью реализации двух взаимоисключающих вариантов разрушения: от разрыва стержней сеток и компрессионного раздавливания кладки переармированных конструкций.

При местном действии нагрузки на угловые или краевые зоны в зависимости от соотношения l_{loc}/l реализуются варианты разрушения сдвига или скола (рис. 6а) либо внецентренного нагружения (рис. 6б) со смещением силового потока относительно оси сжатого элемента. На данный момент какой-либо существенный объем экспериментальных исследований с рассматриваемыми схемами приложения нагрузок и позволяющий адекватно учесть специфику в расчетных положениях отсутствует. Тем не менее, возможность выполнения расчетов имеется и следует выполнять проверку прочности по обоим вариантам развития механизмов разрушения, принимая в качестве результата наименьшее значение несущей способности.

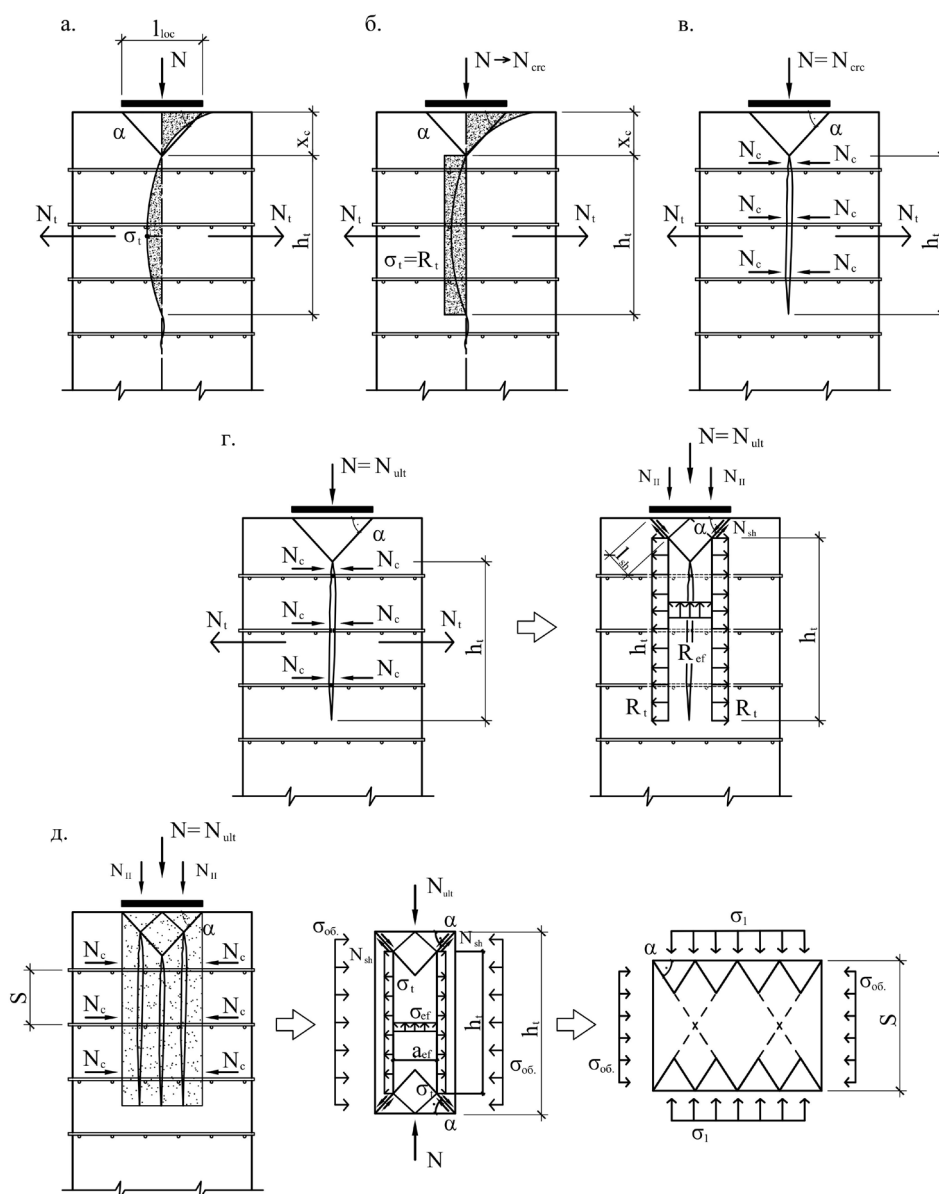


Рис. 5. Стадии напряженно-деформированного состояния конструкции с сетчатым армированием при осевом приложении сжимающей нагрузки: а) стадия упругой работы; б) достижение предела прочности на растяжение; в, г) трещинообразование; д) разрушение (иллюстрация авторов)

Fig. 5. Stages of stress-strain state of structure with mesh reinforcement at axial application of compressive load: а) elastic work stage; б) achievement of ultimate tensile strength; в, г) cracking; д) destruction (illustration by the authors)

С целью изучения описанных эффектов и верификации аналитических зависимостей для случаев сложных напряженных состояний проведены экспериментальные исследования опытных образцов из различных материалов, в том числе армированных сетками и усиленные обоями (рис. 7, 8). Получены ранее опубликованные результаты с ожидаемым и закономерным повышением трещиностойкости, прочности и снижением деформативности относительно базовых образцов без сеток и обоев [2]. В порядке промежуточного обобщения следует отметить:

- формирующееся при нагружении напряженное состояние и реализующиеся в предельном состоянии механизмы разрушения сжатых элементов из каменной кладки, в том числе армированных сетками и (или) усиленных обоями имеют общие качественные признаки на мезоуровне, понятные физические и графические интерпретации стадий НДС. Под мезоуровнем понимается двухкомпонентная структура кладки с объектами взаимодействия: кирпич, раствор, включения в виде сеток или внешними элементами обоев;

- в кладках, армированных сетками и усиленных обоймами, процессы нагружения связаны с трансформациями объемного напряженного состояния, имеющими принципиальные отличия. Отличия связаны с тем, что уровни напряжений в кирпичах и растворе, стержнях кладочных сеток, уложенных в постельные швы, условно равны 0 и их увеличение происходит постепенно по мере возведения и нагружения конструкции с обеспечением совместности деформаций. Случаи с усилением обоймами связаны с начальным наличием достаточно высоких уровней напряжений в кладке характерных зон при том, что в монтируемых элементах стальных обойм или материалах железобетонных и штукатурных обойм существенных напряжений нет. Исключение могут составлять напрягаемые в ходе монтажа хомуты стальных обойм, включающиеся в работу сразу.

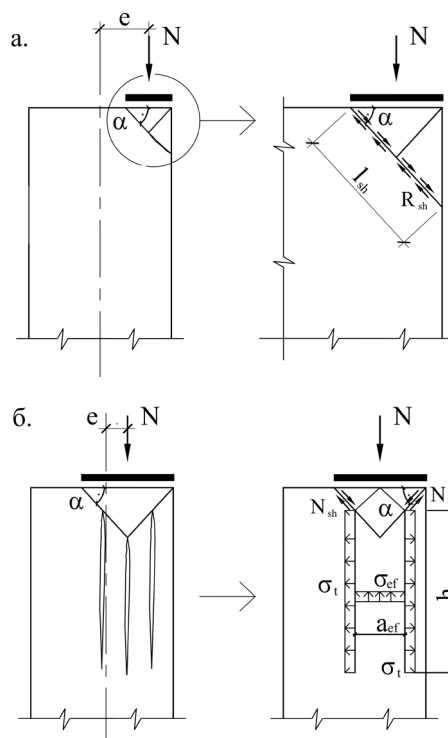


Рис. 6. Построения расчетной схемы конструкции при местном действии нагрузки с различными соотношениями l_{loc}/l : а) случай разрушения от сдвига или скола; б) случай внецентренного нагружения (иллюстрация авторов)

Fig. 6. Development of the design diagram of the structure under local load action with different ratios l_{loc}/l : а) case of destruction due to shear or chipping; б) case of eccentric loading (illustration by the authors)

Включение в работу элементов обойм и возникновение в них усилий происходит при определенных приращениях деформаций, усиливаемого элемента;

- при рассмотрении других видов нагружений на макроуровне имеется возможность определять параметрические отношения σ_i/R_i с построением критериев прочности при плоском и объемном напряженных состояниях. На рис. 9 приведены аналитические зависимости для элементов при плоском и объемном напряженных состояниях:

- точка 1 – напряжение $\sigma_1 = R$, определяемое по формуле:

$$R = k_1 R_t \operatorname{ctg} \alpha + k_2 R_{sh} / \sin \alpha, \quad (1)$$

$$k_1 = A_t / (A - A_{ef}), \quad (2)$$

$$k_2 = 2A_{sh} / (A - A_{ef}), \quad (3)$$

где α - угол наклона поверхностей сдвига в приопорных зонах;

R, R_t, R_{sh} – сопротивления кладки сжатию, растяжению и сдвигу соответственно;

A – площадь поперечного сечения элемента;

A_t, A_{sh}, A_{ef} – площади поверхностей отрыва, сдвига и сечения ядра сжатия соответственно;

k_1, k_2 – соотношения геометрических параметров.

- точка 2 - напряжение σ_2 , соответствующее прочности кладки на растяжение по перевязанному шву с возможными вариантами разрушения по контакту между кирпичом и раствором, по кирпичу или раствору;



Рис. 7. Опытные образцы с кладочными стальными и полимеркомпозитными сетками
а) подготовленный к испытанию образец; б) фрагмент разрушенного образца;
в, г) поперечные сечения образцов, армированных композитными и стальными сетками
(иллюстрация авторов)

Fig. 7. Prototypes with masonry steel and polymer composite grids

а) sample prepared for testing; б) fragment of destroyed sample;
в, г) cross-sections of prototypes reinforced with composite and steel grids (illustration by the authors)

- точка 3 - напряжение σ_1 , соответствующее прочности кладки на растяжение по непереязанному шву с возможными вариантами разрушения по контакту между кирпичом и раствором, по кирпичу или раствору;

- точка 4 - напряжение σ_2 , соответствующее прочности кладки на сжатие вдоль ложковых швов. Определяется по формуле (1) с использованием в качестве R_t сопротивления растяжению раствора;

- точка 5 - линейные зависимости между точками 1-5 и 4-5 определяются с использованием выражения (4) в зависимости от интенсивности сетчатого армирования или хомутов обоймы, создающих обойменный эффект:

$$\sigma_1 = k_1 R_{s,n} (h/S) \operatorname{ctg} \alpha + k_2 R_{sh}^* / \sin \alpha, \quad (4)$$

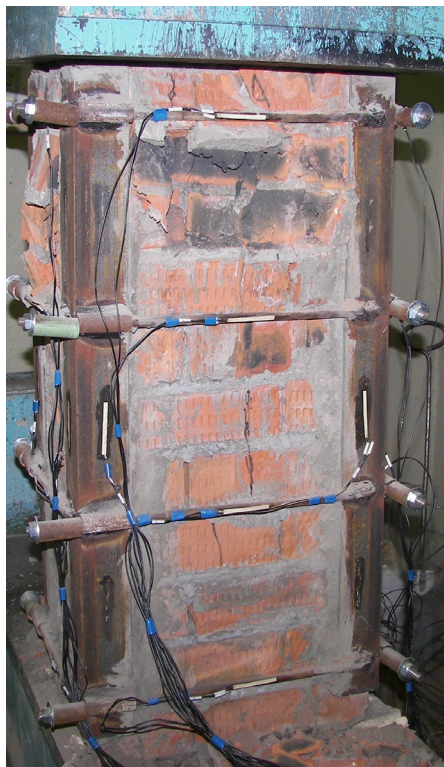
где $R_{s,n}$ – сопротивление материала сетки или хомутов обоймы растяжению;

h_t – высота сжато-растянутой зоны;

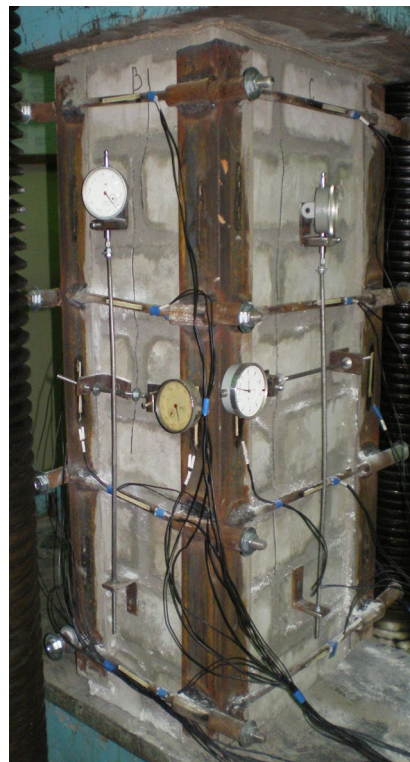
S – шаг сеток по высоте элемента;

R_{sh}^* – приведенное сопротивление кладки сдвигу;

k_1, k_2 – соотношения геометрических параметров.



а)



б)

Рис. 8. Опытные образцы, усиленные обоймами, в том числе с напрягаемыми хомутами
а) образец из керамического кирпича; б) образец из силикатного кирпича (иллюстрация авторов)

Fig. 8. Prototypes reinforced with clips, including those with prestressed clamps
а) ceramic brick prototype; б) silicate brick prototype (illustration by the authors)

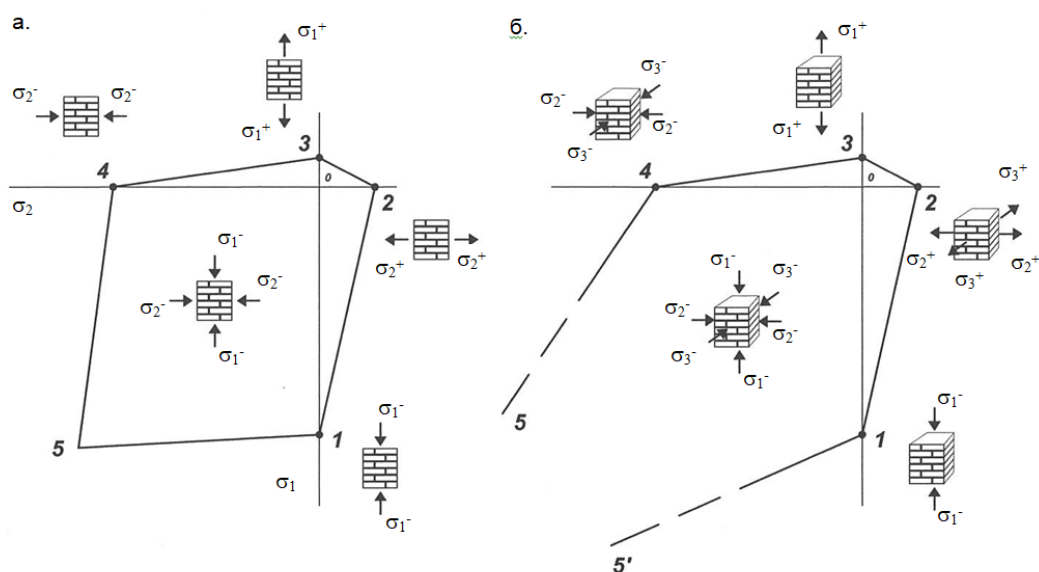


Рис. 9. Критерии прочности кладки при плоском (а) и объемном (б) напряженных состояниях
(иллюстрация авторов)

Fig. 9. Criteria of masonry strength at flat (a) and volumetric (b) stressed states
(illustration by the authors)

Использование данного подхода позволяет получить аналитические критерии прочности каменной кладки с учетом множества значимых факторов, таких как геометрические и физико-механические параметры составляющих конструкцию материалов, условия нагружения, характеристики нормального сцепления кирпича/камня и раствора, особенности обойм усиления в части наличия или отсутствия преднапряжения хомутов.

3. Результаты и обсуждение

В нормах проектирования имеются выражения для определения прочности элементов из каменной кладки, усиленных стальной, железобетонной и штукатурной обоймами. Выражением (54) СП427.1325800.2018 для определения несущей способности каменного столба, усиленного стальной обоймой и содержащего расчетные сопротивления кладки, хомутов и продольных уголков сжатию, предполагается, что данные напряжения в указанных материалах и элементах достигаются одновременно.

При этом прочность кладки и сопротивление стали отличаются на два порядка. Теоретически такое возможно учитывая отличия в значениях модуля упругости стали и модуля деформаций кладки на те же 2 порядка, но должно выполняться условие совместности деформаций кладки и продольных уголков обоймы. Подобные вопросы возникают в отношении выражений того же СП для случаев усиления железобетонной и штукатурной обоймами.

На рис. 10 приведено сопоставление экспериментальных данных авторов и аналитических диаграмм полученных с использованием выражений (1), (4) разработанных авторами и (5) из СП427.1325800.2018 и СП15.13330.2020 соответственно:

$$\sigma_1 = N/A = m_g \varphi R, \quad (8)$$

где N – продольное усилие;

A – площадь поперечного сечения конструкции;

m_g – коэффициент, учитывающий влияние длительной нагрузки;

φ – коэффициент продольного изгиба;

R – расчетное сопротивление кладки сжатию.

Указанные зависимости являются участками критерия прочности между точками 1 и 5* рисунка 9б, характеризующего поведение материала в условиях трехосного сжатия. Расчеты по формуле (5) норм проектирования выполнены для двух случаев – когда сопротивление стали продольных уголков принимается равным расчетному значению R_{sc} и прочности кладки равной $5R$, получаемого по формуле Гвоздева А.А.:

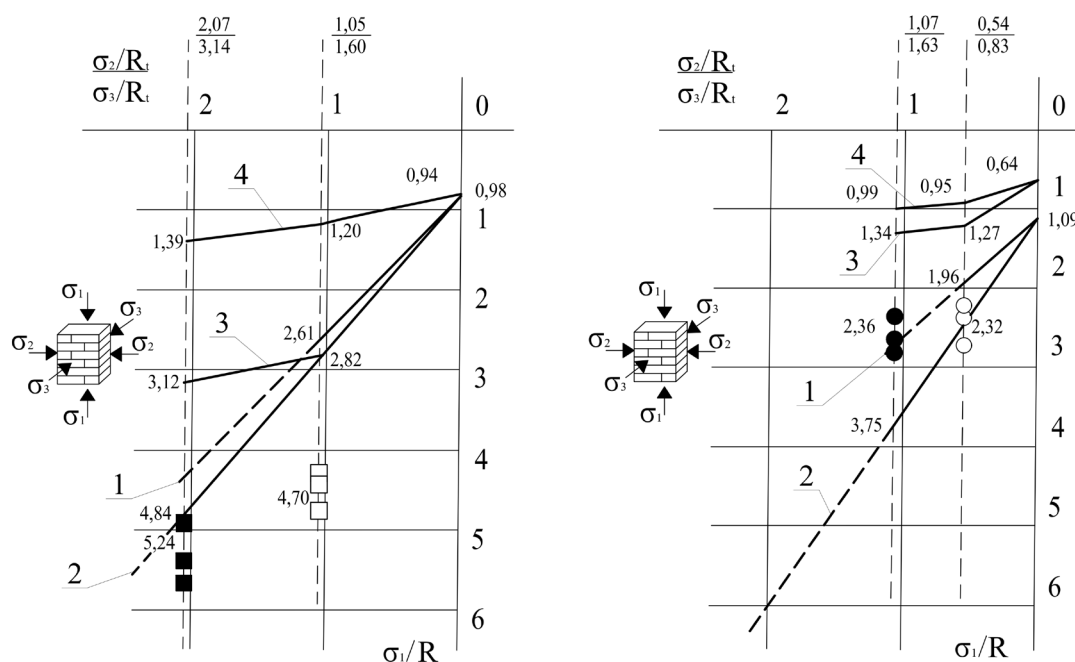
$$R_{ef}^* = R + 4 \sigma_{об} \leq 5R, \quad (9)$$

где R_{ef}^* – приведенное сопротивление кладки сжатию;

R – сопротивление сжатию не усиленной кладки;

$\sigma_{об}$ – обойменное напряжение.

При сопоставлении результатов расчетов с экспериментальными данными видно, что результаты методики СП15.13330.2020 при одноосном сжатии $\sigma_1/R = 0,64...0,94$. Результаты, полученные по формуле (1) ближе к экспериментальным данным- $\sigma_1/R = 0,98...1,09$. Данные расчетов образцов усиленных обоймами, в том числе напряженными, показывают значительное занижение результатов формулой (8) норм в среднем до 2 раз. Результаты, полученные с применением формулы (4) более точны, за исключением серии образцов из керамического кирпича с ненапрягаемыми обоймами.



□ ○ - образцы, усиленные ненапрягаемыми стальными обоймами;

■ ● - образцы, усиленные напрягаемыми стальными обоймами.

Рис. 10. Сравнение опытных данных и результатов расчетов опытных образцов из керамических и силикатных полнотелых кирпичей, усиленных не напряженными и напряженными стальными обоймами.

- 1 – результаты расчетов образцов с ненапрягаемыми обоймами по формулам (1), (4);
- 2 – результаты расчетов образцов с напрягаемыми обоймами по формулам (1), (4);
- 3 – результаты расчетов по формуле (54) СП427.1325800.2018 при R_{sc} ;
- 4 – результаты расчетов по формуле (54) СП427.1325800.2018 при $R_{sc} = 5R$.

(иллюстрация авторов)

Fig. 10. Comparison of experimental data and calculation results of prototypes made of ceramic and silicate solid bricks reinforced with non-stressed and stressed steel clips.

- 1 - results of calculations of prototypes with non-stressed cages by formulas (1), (4);
- 2 - results of calculations of samples with prestressed cages by formulas (1), (4);
- 3 - calculation results according to formula (54) SP427.1325800.2018 at R_{sc} ;
- 4 - calculation results according to formula (54) SP427.1325800.2018 at $R_{sc} = 5R$.

(illustration by the authors)

В таблице 1 приведено сопоставление экспериментальных данных авторов когда были испытаны опытные образцы из керамических и силикатных кирпичей, усиленные железобетонными и штукатурными обоймами, и расчетных значений σ_1 полученных с использованием выражений (4) и (5), (6) из СП427.1325800.2018.

Результаты, полученные по формуле (4) ближе к экспериментальным данным с отклонениями, не превышающими 10%.

Отличительной особенностью предлагаемого подхода является наличие теоретических основ, понятных физических смыслов и адаптивность математического аппарата для описания различных стадий НДС различных конструкций, воспринимающих сжимающие усилия. Данной работой и ранее опубликованными результатами исследований показано, что на единой теоретической основе возможно решение задач различных уровней: от типовых инженерных расчетов с определением прочности или несущей способности до анализа НДС с получением диаграмм деформирования либо построений критериев прочности для случаев сложных двух-, трехосных напряженных состояний.

Таблица 1

Описание образца	Отношение экспериментально полученного и расчетного значения	
	$\sigma_1, \sigma_{1, \text{эксп.}} / \sigma_{1, \text{р.}}$	
	СП427.1325800.2018	Формула (4)
Образцы 1.1, 1.2 из полнотелых керамических кирпичей 1НФ и цементно-песчаного раствора марок М125 и М50 с железобетонными обоями $A_b = 824 \text{ см}^2$, $\mu = 0,12$, $A_s' = 9,05 \text{ см}^2$	1,21	0,96
Образцы 1.3, 1.4 из полнотелых керамических кирпичей 1НФ и цементно-песчаного раствора марок М125 и М50 с железобетонными обоями $A_b = 824 \text{ см}^2$, $\mu = 0,25$, $A_s' = 9,05 \text{ см}^2$	1,26	0,93
Образцы 2.1, 2.2 из полнотелых керамических кирпичей 1НФ и цементно-песчаного раствора марок М125 и М50 с штукатурными обоями $A_b = 824 \text{ см}^2$, $\mu = 0,12$, $A_s' = 9,05 \text{ см}^2$	1,34	0,92

4. Заключение

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. При этом существует множество на первый взгляд однотипных задач, но в тоже время имеющих существенные отличия в нюансах.

Авторами проанализированы стадии НДС и систематизированы значимые факторы для широкого спектра решаемых инженерных и исследовательских задач, в том числе оценки прочности и деформативности при осевом и внецентренном сжатии, местном действии нагрузки и случаях усиления обоями. Показано, что на единой теоретической основе возможно аналитическое описание трансформаций напряженно-деформированного состояния широкого спектра частных случаев приложения сжимающих нагрузок. Кроме того, с использованием известных соотношений механики деформирования возможно получение полноценных критериев прочности кладки при двух- и трехосных состояниях.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта, предоставленного Академией наук Республики Татарстан образовательным организациям высшего образования, научным и иным организациям на поддержку планов развития кадрового потенциала в части стимулирования их научных и научно-педагогических работников к защите докторских диссертаций и выполнению научно-исследовательских работ.

Список литературы/References

1. Соколов Б.С. Теория силового сопротивления анизотропных материалов сжатию и ее практическое применение. Москва: Издательство АСВ. 2011. 159 с. ISBN: 978-5-93093-810-4. EDN: QNPFQJ.
Sokolov B.S. Theory of force resistance of anisotropic materials to compression and its practical application. Moscow: DIA Publishing House. 2011. 159 p. ISBN: 978-5-93093-810-4. EDN: QNPFQJ.
2. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории // Жилищное строительство. 2019. № 9. С. 51-55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55>.
Sokolov B.S., Antakov A.B. Analytical assessment of the stress-strain state of masonry under compression based on the author's theory // Housing construction. 2019. No. 9. P. 51-55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55>.
3. Дегтев И.А., Донченко О.М., Тарасенко В.Н. Прочность и деформативность каменной кладки при силовом сжатии. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова. 2014. 173 с. EDN: WHEGGJ.

- Degtev I.A., Donchenko O.M., Tarasenko V.N. Strength and deformability of masonry under force compression. Belgorod: BSTU. 2014. 173 p. EDN: WHEGGJ.
4. Поздеев М.Л., Смагин И.В., Лобов Д.М., Лихачева С.Ю. Стадии напряженно-деформированного состояния каменной кладки при одноосном сжатии // Приволжский научный журнал. 2025. С. 43-50. EDN: PIHLUC.
Pozdeev M.L., Smagin I.V., Lobov D.M., Likhacheva S.Yu. Stages of stress-strain state of masonry under uniaxial compression // Volga Scientific Journal. 2025. P. 43-50. EDN: PIHLUC.
 5. Asteris P.G., Argyropoulos I., Cavaleri L. Masonry Compressive Strength Prediction Using Artificial Neural Networks // Transdisciplinary Multispectral Modeling and Cooperation for the Preservation of Cultural Heritage: Communications in Computer and Information Science / eds. A. Moropoulou. Cham: Springer International Publishing, 2019. Vol. 962. P. 200–224. URL: http://link.springer.com/10.1007/978-3-030-12960-6_14 (date accessed: 29.08.2025).
 6. Смагин И.В., Поздеев М.Л., Лихачева С.Ю. Обзор критериев прочности каменной кладки // Вестник Евразийской науки. 2025. Том 17 №5. URL: <https://esj.today/PDF/31SAVN525.pdf>. EDN XDUIPO.
Smagin I.V., Pozdeev M.L., Likhacheva S.Yu. Review of masonry strength criteria // Bulletin of Eurasian Science. 2025. Volume 17 No. 5. URL: <https://esj.today/PDF/31SAVN525.pdf>. EDN XDUIPO.
 7. Адищев В.В., Омар М.Д. Шакарнех. Метод гомогенизации определения матрицы эффективных коэффициентов жесткости каменной кладки // Известия ВУЗов. Строительство. 2025. №4. С. 32-44. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-32-44. EDN: HMMASA.
Adishchev V.V., Omar M.D. Shakarneh. Homogenization method for determining the matrix of effective stiffness coefficients of masonry // News of universities. Construction. 2025. No. 4. P. 32-44. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-796-4-32-44. EDN: HMMASA.
 8. Омар М.Д. Шакарнех, Адищев В.В. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния в каменной кладке, усиленной армирующими сетками // Известия ВУЗов. Строительство. 2023. №3. С. 5-21. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-5-21. EDN: LPWWJA.
Omar M.D. Shakarneh, Adishchev V.V. Numerical modeling of the stress-strain state in masonry reinforced with reinforcing grids // News of universities. Construction. 2023. No. 3. P. 5-21. (in Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2023-771-3-5-21. EDN: LPWWJA.
 9. Поздеев М.Л., Лихачева С.Ю. Подбор параметров аппроксимирующей кривой диаграммы сжатия каменной кладки // Приволжский научный журнал. 2023. № 3(67). С. 34-41. EDN LEMXML.
Pozdeev M.L., Likhacheva S.Yu. Selection of parameters of the approximating curve of the masonry compression diagram // Volga Scientific Journal. 2023. No. 3(67). P. 34-41. EDN LEMXML.
 10. Поздеев М.Л., Лихачева С.Ю. Квазиортотропная деформационная теория пластичности каменных кладок при плоском напряженном состоянии // Вестник НИЦ «Строительство». 2024. № 43(4). С. 218–231. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-218-231](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-218-231). EDN CYKUXR.
Pozdeev M.L., Likhacheva S.Yu. Quasi-orthotropic deformation theory of plasticity of masonry in a flat stressed state // Bulletin of the Research Center "Construction". 2024. No. 43(4). P. 218-231. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4\(43\)-218-231](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-4(43)-218-231). EDN CYKUXR.
 11. Адищев В.В., Омар М.Д. Шакарнех. Идентификация эффективных жесткостных характеристик каменных кладок на основе сравнительного анализа результатов численных и физических экспериментов // Известия ВУЗов. Строительство. 2024. №8. С. 5-21. DOI: 17.32683/0536-1052-2024-788-8-5-21. EDN: KGHMCC.
Adishchev V.V., Omar M.D. Shakarneh. Identification of effective stiffness characteristics of masonry based on a comparative analysis of the results of numerical

- and physical experiments // News of universities. Construction. 2024. No. 8. P. 5-21. DOI: 17.32683/0536-1052-2024-788-8-5-21. EDN: KGHMCC.
12. Поздеев М.Л., Лихачева С.Ю. Ортоотропный критерий прочности неармированной каменной кладки для моделей нелинейно-упругого тела // Вестник Евразийской науки. 2025. Том 17 № 43(4). URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN225.pdf>. EDN OGUYIA.
Pozdeev M.L., Likhacheva S.Yu. Orthotropic strength criterion for non-reinforced masonry for models of non-linear elastic body // Bulletin of Eurasian Science. 2025. Volume 17 No. 43(4). URL: <https://esj.today/PDF/76SAVN225.pdf>. EDN OGUYIA.
13. Nastri E., Todisco P. Macromechanical Failure Criteria: Elasticity, Plasticity and Numerical Applications for the Non- Linear Masonry Modelling // Buildings. 2022. - Volume 12. - Macromechanical Failure Criteria. – No. 8. DOI: 10.3390/buildings12081245. EDN: XCPKSU.
14. Noor-E-Khuda S. An Explicit Finite-Element Modeling Method for Masonry Walls Using Continuum Shell Element // Journal of Architectural Engineering. 2021. No.27(4). DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000518. EDN: YDCFAH.
15. D'Amato M., Sulla R. Investigations of masonry churches seismic performance with numerical models: application to a case study // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2021. No.21 (4). DOI: 10.1007/s43452-021-00312-5. EDN: KITWRI.
16. Shakor P., Gowripalan N., Rasouli H. Experimental and numerical analysis of 3D printed cement mortar specimens using inkjet 3DP // Archives of Civil and Mechanical Engineering. 2021. No.21(2). DOI: 10.1007/s43452-021-00209-3. EDN: PHECKK.
17. Nowak R., Kania T., Derkach V. Strength Parameters of Clay Brick Walls with Various Directions of Force // Materials. 2021. Vol. 14, No. 21. DOI: 10.3390/ma14216461. EDN: ITAMSQ.
18. Грановский А.В. Каменная кладка: хрупкий или пластичный материал? // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 3. С. 22-28. EDN: ZAHMEN.
Granovsky A.V. Masonry: brittle or plastic material? // Industrial and civil construction. 2019. No. 3. P. 22-28. EDN: ZAHMEN.
19. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Практическое применение расчета каменных кладок с использованием диаграмм деформирования материалов // Вестник приволжского территориального отделения РААСН. 2022. С. 119-125. EDN: BWIPNQ.
Sokolov B.S., Antakov A.B. Practical application of masonry calculation using material deformation diagrams // Bulletin of the Volga region RAASN. 2022. No. 9. P. 119-125. EDN: BWIPNQ.

Информация об авторах

Антаков Алексей Борисович, кандидат технических наук, доцент, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: antakof@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8712-4134

Мирсаяпов Илшат Талгатович, доктор технических наук, профессор, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, г. Казань, Российская Федерация

E-mail: mirsayapovit@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4902-6167

Information about the authors

Alexey B. Antakov, candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

E-mail: antakof@mail.ru, ORCID: 0000-0001-8712-4134

Ilshat T. Mirsayapov, doctor of Technical Sciences, Professor, Kazan State University of Architecture and Engineering, Kazan, Russia

E-mail: mirsayapovit@mail.ru, ORCID: 0000-0003-4902-6167

Дата поступления: 11.07.2026

Дата принятия: 30.09.2026