

УДК 624.074

Соколов Б.С. – доктор технических наук, профессор

E-mail: sokolov@kgasu.ru

Антаков А.Б. – кандидат технических наук, доцент

E-mail: antakof@mail.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Новый подход к расчету каменных кладок

Аннотация

В статье приводятся основные положения нового подхода к расчету каменных кладок на основе теории сопротивления анизотропных материалов сжатию с элементами диаграммного метода. Достоверность результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических и опытных данных, полученных авторами и другими исследователями. Разработаны алгоритмы решения прямой и обратной задач с учетом возможных особенностей напряженно-деформированного состояния элементов и конструкций: внецентренное сжатие, местное действие нагрузки, наличие косвенного армирования и обойм усиления различных видов, НДС арочных и клинчатых перемычек. Область применения предлагаемой методики охватывает всю номенклатуру, виды и типы каменных кладок, элементов и конструкций.

Ключевые слова: каменная кладка, прочность, теория, диаграммный метод.

Современное строительство неразрывно связано с использованием обширной номенклатуры каменных материалов. Размерный ряд применяемых каменных материалов, помимо традиционных для России одинарных и полуторных керамических и силикатных кирпичей, включает множество высокотехнологичных изделий от узкого клинкерного кирпича до керамического блока «Поротерм51». Теплотехнические свойства отмеченных изделий определяются конструктивными особенностями и материалами, применяемыми для их изготовления: поризованная керамика и бетоны, смеси с гранулированными утеплителями и т.п. Таким образом, каменные кладки становятся областью применения высокотехнологичных, эффективных изделий, создающих гармоничную среду обитания человека. При этом степень изученности каменных кладок, оцениваемая по объему исследований и развитости расчетных подходов не отвечает требованиям по ресурсосбережению. В основе методики российского СП15.13330.2012 принята эмпирическая зависимость для определения прочности кладки, предложенная проф. Онищиком Л.И. в 1930-е годы, существенно занижающая несущую способность кладок из современных материалов и не отражающая характера трещинообразования и разрушения [1]. Такое состояние характерно не только для России – в нормах проектирования Евросоюза и США присутствуют эмпирические зависимости, оперирующие ограниченным количеством факторов и весьма далекие от каких-либо теоретических построений. В результате этого имеется значительный разрыв между современным состоянием отрасли в области использования каменных кладок и нормативной базой, регламентирующей их проектирование.

Проводимые в настоящее время исследования в области прочности и деформативности каменных кладок можно обобщенно разделить на два основных направления. Первое связано с экспериментальным определением корректирующих коэффициентов к существующим эмпирическим зависимостям, выполняемое в рамках сертификации новых внедряемых материалов и конструктивных решений кладок. В рамках второго направления исследователи разрабатывают подходы к определению гомогенных или, в традиционной трактовке, приведенных характеристик «периодически повторяющихся гетерогенных структур, проявляющих анизотропные свойства» для автоматизированных алгоритмов расчета, в том числе методом конечных элементов [2-4].

С целью совершенствования и развития методов расчета каменных кладок, элементов и конструкций авторами ведутся комплексные исследования в данной области

и разработка методов оценки НДС на основе теории сопротивления анизотропных материалов при сжатии [5].

В ранее опубликованных материалах описаны методики определения прочности и трещиностойкости кладок, в том числе из пустотных и поризованных материалов, с косвенным армированием и усилением обоями различных видов, подходы к оценке НДС клинчатых и арочных перемычек и т.п. [6]. Достоверность результатов подтверждается удовлетворительной сходимостью теоретических и опытных данных в пределах $\pm 5-25\%$. Основная идея данных методик сводится к определению прочности кладки в зависимости от величин сопротивления материала кирпича или камня сжатию, растяжению и срезу, геометрических параметров нагружаемого элемента на основе физической модели разрушения анизотропных материалов в сжимающем силовом потоке [5].

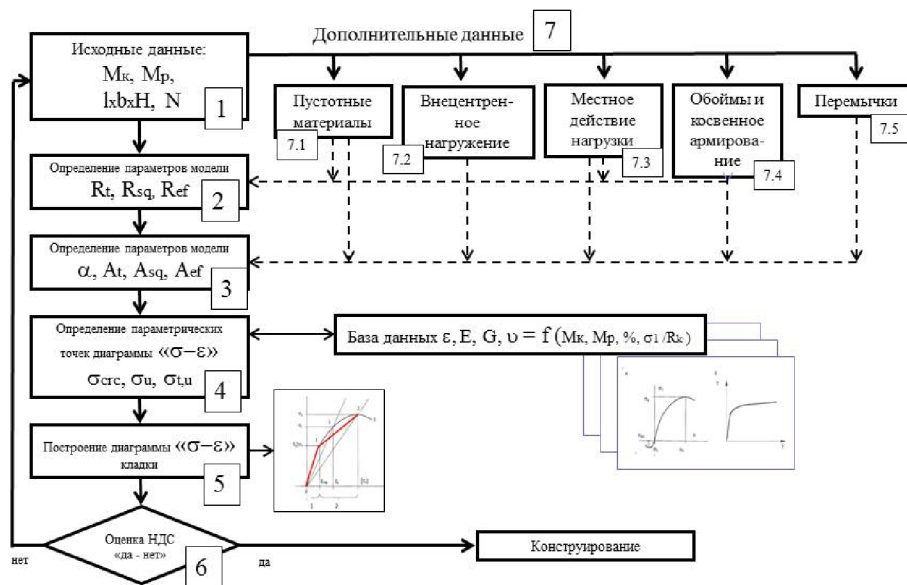


Рис. 1. Структурная схема алгоритма методики расчета элементов и конструкций из каменных кладок

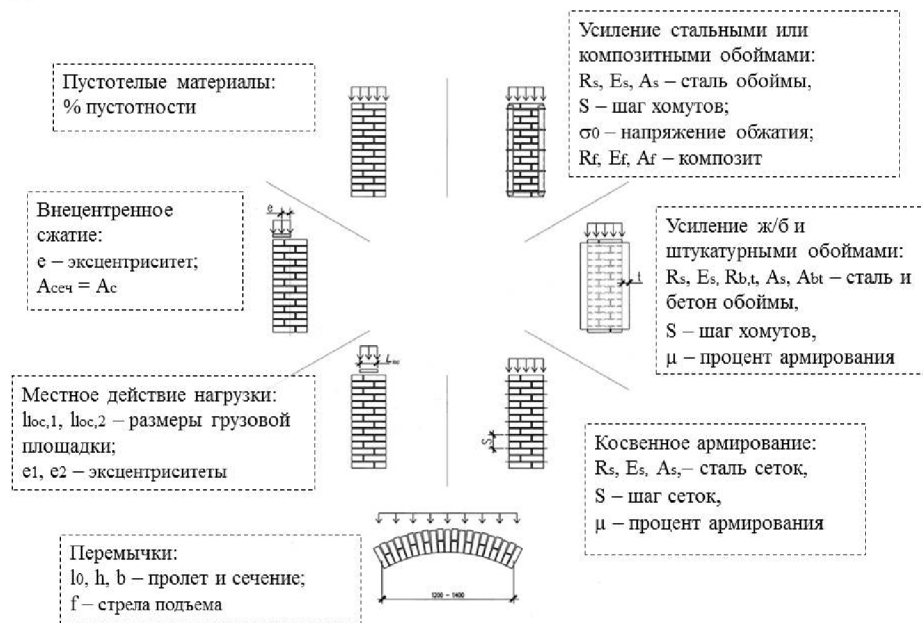
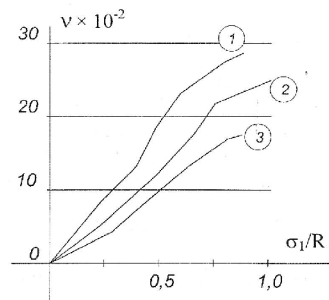


Рис. 2. Дополнительные расчетные параметры

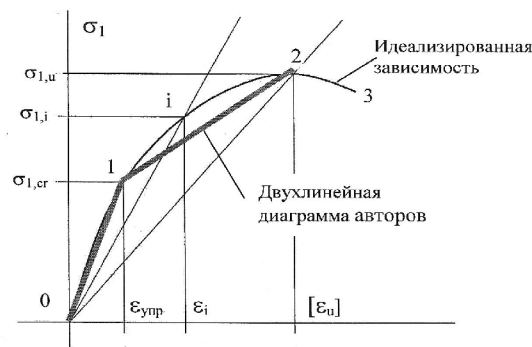
Следующим этапом, результаты которого приведены в настоящей статье, является разработка подходов к оценке НДС сжатых кладок с использованием элементов диаграммного метода, обобщение и объединение частных методик в едином структурном алгоритме (рис. 1). Дополнительными данными в составе исходных параметров являются характеристики, приведенные на рис. 2. Содержание блоков 1-3, 7, разрабатываемое и уточняемое с 2002 года, неоднократно рассмотрено в зависимости от типов решаемых задач и опубликовано авторами [6, 7].

Общая идеология оценки НДС каменной кладки с использованием диаграмм деформирования опубликована [8] и предполагает использование данных зависимостей для двух структурных уровней: кладка – макроуровень и камень – мезоуровень [3]. Подобное деление применяется в двухстадийном моделировании методом конечных элементов (МКЭ) композитных систем для оценки приведенных характеристик среды, именуемой квазиоднородной [9 и др.].



1 – кладка из полнотелого керамического кирпича марки М100 на растворе марки М50;
 2 – кладка из полнотелого силикатного кирпича марки М150 на растворе марки М50;
 3 – кладка из пустотелого керамического кирпича марки М75 на растворе марки М50

Рис. 3. Примеры зависимостей $\sigma_1/R-v$ для различных кладок.



- участок 0-1 – упругое деформирование ($E=E_0$);
 - участок 1-2 – неупругие деформации ($E=\sigma_i/\epsilon_i$);
 - участок 2-3 – разрушение

Рис. 4. Диаграмма деформирования кладки

На данном этапе исследований построение диаграмм деформирования кладки производится с использованием расчетного аппарата теории сопротивления анизотропных материалов сжатию – определяются значения напряжений σ_1 , являющиеся параметрическими точками диаграммы и соответствующие началу трещинообразования и разрушению. Величины относительных деформаций ϵ , соответствующие полученным величинам $\sigma_{1,cr}$ и $\sigma_{1,u}$, вычисляются через значения текущих модулей упругости/деформаций камня и зависимостей « $\sigma_1/R-v$ », полученных авторами для множества испытанных образцов кладки из различных материалов (рис. 3). Относительные деформации кладки ϵ_{cr} , соответствующие началу трещинообразования определяются как:

$$\epsilon_{cr} = E_0^{камень} v,$$

где $E_0^{\text{камень}}$ – модуль упругости материала камня определяется опытным путем или по методике СП15.13330.2012;

ν – коэффициент Пуассона, соответствующий уровню напряжений σ_1/R (рис. 3).

Предельные деформации могут быть вычислены:

$$\varepsilon_u = \sigma_u / [2G_i (1+\nu)],$$

где G_i – модуль сдвига материала камня, определяемый опытным путем не для каждого конкретного изделия, а для групп материалов: керамика плотная или поризованная, бетон, силикатный камень и т.п. В качестве значения предельных деформаций ε_u могут быть приняты значения в зависимости от вида кладки и использованных материалов, полученные ранее авторами, отечественными и зарубежными исследователями. В случае внедрения новых материалов или конструктивных решений эти данные будут получены в рамках сертификационных испытаний. На рис. 4 показана двухлинейная диаграмма деформирования кладки при сжатии, полученная с использованием описанного подхода, с наложением на идеализированную зависимость.

Очевидно, что на участке 0-1, характеризующем упругую работу кладки отклонения минимальны и не превышают 3-5 %. Линейзация диаграммы на участке 1-2, описывающем нелинейные процессы деформирования приводит к некоторым погрешностям величин секущего модуля E для i -го значения σ_1 интервала $[\sigma_{1,crs} - \sigma_{1,u}]$ в пределах 10-15 %. Возможно описание данного участка диаграммы выражением второго или третьего порядка, что позволит более точно отразить нелинейность зависимости.

Получение диаграмм деформирования при линейных воздействиях и сдвиге материалов камня, необходимых для оценки НДС в характерных напряженных областях отрыва, сдвига и раздавливания, производится опытным путем либо с использованием упрощенного опытно-теоретического подхода на основе исследований авторов. Первый вариант связан с необходимостью проведения комплексных лабораторных испытаний образцов материала камня на сжатие, срез и растяжение. Во втором, используются установленные авторами зависимости пределов прочности камня из различных материалов на растяжение и сдвиг относительно сопротивления сжатию – $R_{k,t}/R_k = 0,04-0,08$, $R_{k,sq}/R_k = 0,18-0,3$. При наличии результатов испытания образцов камня на сжатие по величинам указанных соотношений могут быть построены кусочно-линейные диаграммы деформирования материала при растяжении и сдвиге.

На основе расчетного аппарата теории и приведенных зависимостей разработана методика расчета элементов и конструкций из каменных кладок, реализованная в виде блок-схем решения прямой и обратной задач. Последовательности решения данных задач приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Последовательность решения прямой задачи

Определение параметров НДС кладки в зависимости от известных характеристик конструкции	
1	Исходные данные: - геометрия: l, b, h ; - марки материалов: M_k, M_p ; - дополнительные данные
2	Формирование модели [11]: - геометрия: $\alpha, A_t, A_{sq}, A_{ef}$; - сопротивления: $R_t, R_{sq} = f(R_k)$
3	Определение параметрических точек и формирование диаграммы « σ - ε »: - вычисление σ_{crs}, σ_u [11, 12]; - выбор $\varepsilon_{crs}, \varepsilon_u$ по видам кладки и типам материалов
4	Определение допустимых величин σ_1 , в зависимости от принятых критериев и расчетных предпосылок: - допустимость трещинообразования; - величины $[\varepsilon]$ и т.п.
5	Определение величины несущей способности $N_{вн}$ по формулам (10), (13) или (17) СП15.13330.2012

* – в зависимости от вида нагружения: центральное или внецентренное сжатие, местное действие нагрузки.

Таблица 2

Последовательность решения обратной задачи

Подбор характеристик конструкции в зависимости от величины нагрузки	
1. Исходные данные: нагрузка – N_{BH} , дополнительные данные	
2.1. Известны или заданы марки материалов: M_K, M_P	2.2. Известна или задана геометрия сечения: $l*b$
3.1. Определение сопротивлений: $R_t, R_{sq} = f(R_k)$	3.2. Назначение данных 1-ой итерации: l_1*b_1
4.1. Определение значений: $\alpha, A_t, A_{sq}, A_{ef}$	4.2. Определение значений: $N_t, N_{sq}, N_{ef} = f(N_{BH}, A_{сеч})$
5.1. Определение расчетных размеров сечения: $l_p*b_p = f(A_t)$	5.2. Определение величин напряжений в характерных зонах элемента: $\sigma_t = f(N_t)$ – область отрыва; $\tau = f(N_{sq})$ – поверхности сдвига; $\sigma_{ef} = f(N_{ef})$ – ядро сжатия
6.1. Назначение модульных размеров: $l_m*b_m > l_p*b_p$	6.2. Определение требуемых величин сопротивлений: $R_t = k_1 \sigma_t; R_{sq} = k_2 \tau; R_{ef} = k_3 \sigma_{ef}$. k_i – коэффициенты надежности ($k=2.0$ СП).
7.1. Определение $\sigma_1 = N_{BH}/A_{сеч}$.	7.2. Определение требуемых марочных прочностей кирпича и раствора: $M_k^{TP} = M(R_{ef}), M_p^{TP} = k M_k$
8.1. Определение величин напряжений в характерных зонах элемента: $\sigma_t = f(R_t, A_t)$ – область отрыва; $\tau = f(R_t, A_t)$ – поверхности сдвига; $\sigma_{ef} = f(R_t, A_t)$ – ядро сжатия	8.2. Выбор и назначение марок кирпича и раствора: $M_k > M_k^{TP}, M_p > M_p^{TP}$
9.1. Оценка прочности материала камня – соотнесение величин $\sigma_t \sim \sigma_{tu}, \tau \sim \tau_u, \sigma_{ef} \sim \sigma_{ku}$ и при необходимости корректировка исходных данных	9.2. Проверка – действия п.п. 3.1-9.1

В описанных алгоритмах предусмотрен итерационный процесс для обеспечения возможности корректировки исходных параметров в зависимости от назначаемых критериев пригодности к эксплуатации. Поддержка актуальности методики при появлении каких-либо новых материалов или изделий, применяемых для каменных конструкций, будет заключаться во внесении их параметров: геометрических и физико-механических в существующую базу данных.

Описанный подход к оценке НДС каменных кладок позволяет теоретически обоснованно и методологически гибко выполнять расчеты практически любых элементов и конструкций, оценивать необходимость косвенного армирования или усиления. Сопоставление опытных и теоретических данных показывает удовлетворительную сходимость в пределах 5-25 %. Планируемая реализация результатов исследований в виде прикладных программ или приложения к существующим комплексам позволит создать эффективную, современную, конкурентно способную методику расчета каменных и армокаменных кладок.

Список библиографических ссылок

1. Онищик Л.И. Каменные конструкции. ГосСтрой. – М., 1939. – 208 с.
2. Пангаев В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – Новосибирск, 2009. – 268 с.
3. Комохов П.Г., Беленцов Ю.А. Структурная механика разрушения кирпичной кладки // Строительные материалы, 2004, № 11. – С. 46-47.
4. Zuccyini A., Lourenço P.V. – Mechanics of masonry in compression. Result from a homogenization approach / Computers and structures 85 (2007). – С. 193-204.

5. Соколов Б.С. Теория силового сопротивления анизотропных материалов сжатию и ее практическое применение: Монография/ Издательство АСВ. – М.: 2011. – 160 с.
6. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Исследования сжатых элементов каменных и армокаменных конструкций. Научное издание. – М.: Издательство АСВ, 2010. – 104 с.
7. Соколов Б.С., Антаков А.Б., Фабричная К.А. Комплексные исследования прочности пустотело-поризованных керамических камней и кладок при сжатии // Вестник гражданских инженеров: СпбГАСУ, 2012, № 5 (34). – С. 65-71.
8. Соколов Б.С., Антаков А.Б. К использованию диаграммного метода для расчета каменных кладок // Материалы I Международной (VII Всероссийской) конференции «Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции». – Чебоксары, 2012. – С. 43-46.
9. Дубинский С.И., Лихачева С.Ю., Антаков А.Б. Численное моделирование испытаний кирпичной кладки с использованием ПК ANSYS // Сборник трудов III Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений». – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2010. – С. 89-90.

Sokolov B.S. – doctor of technical science, professor

E-mail: sokolov@kgasu.ru

Antakov A.B. – candidate of technical science, associate professor

E-mail: antakof@mail.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

New approach to calculation of stone layings

Resume

Standard method of calculation of stone layings of Russia and other countries are based on the empirical dependences, operating with limited quantity of factors and not reflecting specifics of a tension and destruction. Researches conducted now in the field of durability of stone layings can be divided into two main directions generally. The first is connected with experimental determination of correcting coefficients to the existing empirical dependences, carried out within certification of new introduced materials and constructive solutions of layings. Within the second direction researchers develop approaches to definition homogeneous or, in the traditional treatment, the provided characteristics of «periodically repeating heterogeneous structures showing anisotropic properties» for the automated algorithms of calculation, including a method of final elements.

In article basic provisions of new approach are given to calculation of stone layings on the basis of the theory of resistance of anisotropic materials to compression with elements of a chart method. Reliability of results is confirmed by satisfactory convergence of the theoretical and skilled data obtained by authors and other researchers. Algorithms of the solution of direct and return tasks taking into account possible features of a tension of elements and designs are developed: non-central compression, local action of loading, existence of indirect reinforcing and holders of strengthening of different types, tension of arch crossing points. The scope of an offered technique covers all nomenclature, types and types of stone layings, elements and designs.

Keywords: masonry, strength, ceramic brick, the theory.

Reference list

1. Onishchik L.I. Stone designs. State Committee for Construction. – М., 1939. – 208 p.
2. Pangayev V.V. Development of settlement and experimental methods of research of durability of a laying of stone designs. The thesis on competition of a scientific degree of the Doctor of Engineering. – Novosibirsk, 2009. – 268 p.
3. Komokhov P.G., Belentsov Yu.A. Structural mechanics of destruction brick laying // Construction materials, 2004, № 11. – P. 46-47.

4. Zuccyini A., Lourenço P.B. – Mechanics of masonry in compression. Result from a homogenization approach / Computers and structures 85, 2007. – P. 193-204.
5. Sokolov B. S. Theory of power resistance of anisotropic materials to compression and its practical application: ASV Monograph / Publishing house. – M.: 2011. – 160 p.
6. Sokolov B.S., Antakov A.B. Researches of the squeezed elements of stone and reinforced masonry designs. Scientific edition. – M.: ASV publishing house, 2010. – 104 p.
7. Sokolov B.S., Antakov A.B., Factory K.A. Complex research of durability hollow porous ceramic stones and layings at compression // Messenger of civil engineers: SPbGASU, 2012, № 5 (34). – P. 65-71.
8. Sokolov B.S., Antakov A.B. To use of a chart method for calculation of stone layings // Materials 1 International (the VII All-Russian) conferences «New in architecture, design of construction designs and reconstruction». – Cheboksary, 2012. – P. 43-46.
9. Dubinsky S.I., Likhacheva P.Yu., Antakov A.B. Numerical modeling of tests of a bricklaying with ANSYS personal computer use // Collection of works III of the International symposium «Actual problems of computer modeling of designs and constructions». – Novocherkassk: YuRGTU(NPI), 2010. – P. 89-90.