

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВИЛЬНЮССКОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА им. ГЕДЕМИНАСА
БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ АГРАРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (УКРАИНА)
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ г. ЛЕЙРИИ (ПОРТУГАЛИЯ)
АРИЭЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ (ИЗРАИЛЬ)
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)
ПЕТРОЗАВОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ (РОССИЯ)

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС:
ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**

Электронный сборник статей
международной научной конференции,
посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета

(Новополоцк, 5-6 апреля 2018 г.)

Под редакцией
канд. техн. наук, доцента А. А. Бакатовича;
канд. техн. наук, доцента Л. М. Парфеновой

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2018

Редакционная коллегия:

А. А. Бакатович (председатель), Л. М. Парфенова (зам. председателя),
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,
Т. И. Королева, В. Е. Овсейчик

АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ [Электронный ресурс] : электронный сборник статей международной научной конференции, посвященной 50-летию Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 5–6 апр. 2018 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. А. А. Бакатовича, Л. М. Парфеновой. – Новополоцк, 2018. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

Рассмотрены вопросы архитектуры и градостроительства в современных условиях, прогрессивные методы проведения инженерных изысканий и расчета строительных конструкций. Приведены результаты исследований ресурсо- и энергосберегающих строительных материалов и технологий, энергоресурсосберегающие и природоохранные инновационные решения в инженерных системах зданий и сооружений. Рассмотрены организационные аспекты строительства и управления недвижимостью, проблемы высшего архитектурного и строительного образования.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов строительных специальностей учреждений образования.

Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3671815379 от 26.04.2018.

Компьютерный дизайн К. В. Чулковой, В. А. Крупенина.

Технический редактор О. П. Михайлова.

Компьютерная верстка Т. А. Дарьяновой.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 53 53 92, e-mail: a.bakatovich@psu.by; l.parfenova@psu.by

**РАСЧЁТ СЖАТЫХ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ***А.М. Хаткевич*

Полоцкий государственный университет, Беларусь

email: a.khatkevich@psu.by

Рассматривается метод расчета параметров напряженно-деформированного состояния поперечных сечений сжатых каменных и армокаменных элементов, основанный на положениях общей деформационной модели. Предлагаемый метод позволяет осуществлять расчет сечений каменных элементов любой формы с любыми параметрами армирования, учитывая физическую нелинейность в виде диаграмм деформирования исходных материалов.

Ключевые слова: каменные и армокаменные элементы, сжатие, физическая нелинейность, деформационная модель.

**CALCULATION OF COMPRESSION OF MASONRY AND REINFORCED MASONRY ELEMENTS
TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NON-LINEARITY***A. Khatkevich*

Polotsk State University, Belarus

email: a.khatkevich@psu.by

The article considers a method for calculating the parameters of the stress-strain state of the normal to the longitudinal axis cross-sections of compressed masonry and reinforced masonry elements, based on the positions of the general deformed model. The proposed method makes it possible to calculate the cross-sections of masonry elements of any shape with any reinforcement parameters, taking into account the physical non-linearity in the form of deformation diagrams of the initial materials.

Keywords: masonry and reinforced masonry elements, compression, physical nonlinearity, the deformation model.

Введение. Сжатые каменные и армокаменные элементы в виде столбов, простенков, фундаментов, пилонов и других конструкций, изготовленных из каменной кладки и арматуры, широко применяются в зданиях и сооружениях различного назначения.

Идеализация каменной кладки, применяемая для получения данных о напряженно-деформированном состоянии сжатых элементов и выполнения расчетов по предельным состояниям, отличается достаточно большим разнообразием. В то же время используемые модели можно свести в две группы. К *первой* группе относятся модели, в которых кладка представляет собой материал со сложной композитной структурой, состоящий из кладочных элементов, заключенных в растворную матрицу, при этом физико-механические характеристики камней и раствора резко отличаются между собой. Такие модели рассматривались в работах Н.К. Hilsdorf [1; 2], Pöschel и Sabha [3], В.В. Пангаева [4] и других. Расчет можно также выполнять с применением метода конечных элементов, что пока не получило широкого распространения для практических целей из-за необходимости введения большого количества исходных данных (конечных элементов), сложности описания их взаимодействия в зоне контакта, необходимости наличия специализированного программного обеспечения и т.п. К тому же к недостаткам моделей первой группы следует отнести невозможность учета многих случайных факторов, таких как: изменчивость геометрии кирпича и толщины швов, неплотность заполнения, усадка раствора в швах и другие технологические особенности.

В случае рассмотрения реальных каменных и армокаменных элементов, когда чередующиеся объемы однородного вещества значительно меньше размеров самой конструкции, для расчета ее напряженно-деформированного состояния во второй группе методов применяется метод сечений с гомогенизацией (заменой неоднородной структуры каменной кладки на однородную изотропную либо анизотропную с осредненными физико-механическими характеристиками). Физико-механические характеристики зависят от многих факторов (характера и направления приложения усилий, технологических особенностей каменной кладки, свойств материалов) и устанавливаются опытным путем либо по аналитическим зависимостям, построенным по результатам физического эксперимента. Практика проектирования и эксплуатации зданий и сооружений подтверждает обоснованность применения такого подхода. Определение обобщенных характеристик кладки было выполнено рядом советских ученых, созданы нормы проектирования. Вначале были разработаны положения расчета каменных элементов по допускаемым напряжениям, а позже переработаны в метод расчета по разрушающим усилиям и предельным состояниям. В направлении разработки критериев разрушения кладки как однородного материала, в том числе и с учетом диаграмм деформирования, известны работы Г.Г. Кашеваровой [5; 6], Г.А. Гениева [7; 8], A.W. Page [9], V. Lishak [10] и других.

Методика расчета сопротивления сжатию с учетом физической нелинейности. В [11–14] при расчете сжатых элементов каменная кладка рассматривается как однородный с осредненными физико-механическими характеристиками материал. Применяя метод сечений, сопротивление, соответствующее прочности каменного элемента в предельной стадии, находится из уравнений равновесия внутренних и внешних усилий. При этом фактически криволинейная эпюра напряжения в сжатой зоне сечения (рисунок 1, а) в предельной стадии заменяется на укороченную прямоугольную (рисунок 1, б, в). Упрощение в виде замены в расчетах криволинейной эпюры вызвано отсутствием методики, позволяющей учесть фактическое распределение напряжений.

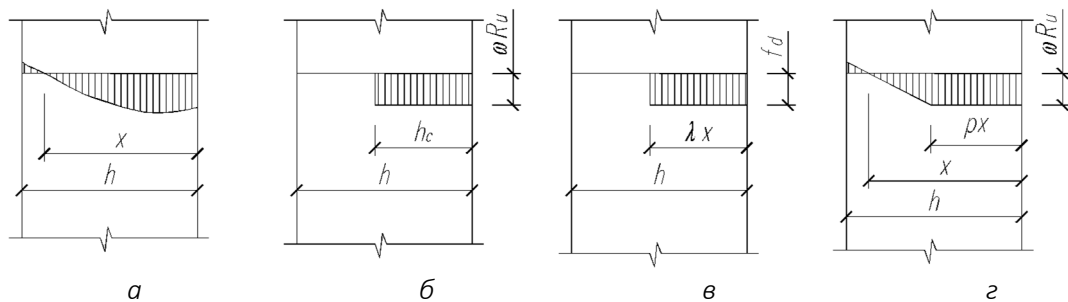


Рисунок 1. – Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении: Фактическое (а); по [11, 12] (б); по [13, 14] (в); по [15] (г)

На рисунке 1 введены следующие обозначения: h – высота сечения в плоскости эксцентриситета; x – фактическая высота сжатой зоны; h_c – высота сжатой зоны сечения по [11; 12]; λx – высота сжатой зоны сечения по [13, 14]; p – число пластичности; R_u – предел прочности кладки; w – коэффициент, учитывающий величину эксцентриситета; f_d – сопротивление кладки сжатию по [13, 14].

Сущность методики заключается в рассмотрении сечения сжатого каменного или армокаменного элемента в виде совокупности k элементарных площадок с площадью A_{mi} , и n продольных стержней с площадью A_{sj} (рис. 2) в пределах которых деформации считаются равномерно распределенными.

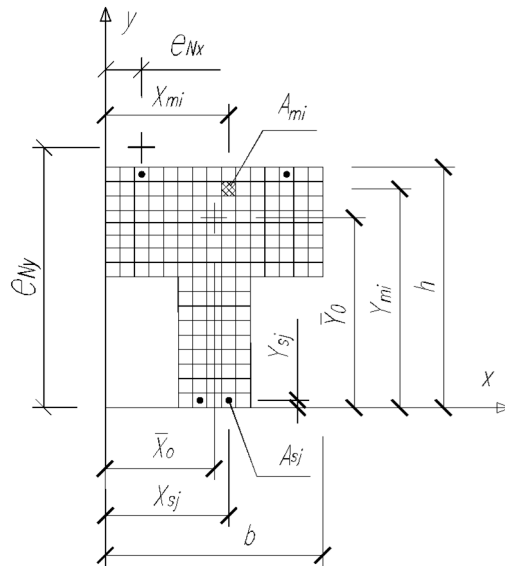


Рисунок 2. – Расчетная схема нормального к продольной оси сечения, разбиение на элементарные площадки

Методика расчета позволяет рассчитывать параметры напряженно-деформированного состояния нормальных к продольной оси сечений сжатых каменных и армокаменных элементов на любой стадии нагружения, основана на учете физической нелинейности в виде диаграмм деформирования кладки и арматуры; она рассматривалась в работах [16; 17; 18]. Расчет параметров сечений производится из следующих условий: равновесия усилий; соблюдения гипотезы плоских сечений; учета диаграмм деформирования кладки и арматуры. Алгоритм определения параметров напряженно-деформированного состояния, нормального к продольной оси сечения от заданной величины усилия предусматривает итерационный процесс вычисления относительных деформаций и напряжений в элементарных площадках. Если напряжения в растянутой зоне элементарной площадки превышают предельные значения, то это свидетельствует об образовании трещины. Учет их наличия выполняется принятием в последующих расчетах нулевой жесткости такой площадки. Критерием окончания процесса последовательных приближений является заданная точность вычисления деформационных параметров на смежных итерациях. Алгоритм определения прочности сечения предусматривает пошаговый метод последовательных нагружений с итерационным процессом вычисления относительных деформаций и напряжений в элементарных площадках на каждом шаге до заданной точности вычисления деформационных параметров. За прочность сечения в предельной стадии принимается максимальное усилие от нагрузки, при котором сходится процесс последовательных приближений в виде уравнений равновесия:

$$\begin{cases} \sum N = 0 \\ \sum Mx = 0 \\ \sum My = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^k \sigma_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} A_{sj} - N = 0; \\ \sum_{i=1}^k \sigma_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) - N \cdot e_x = 0; \\ \sum_{i=1}^k \sigma_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n \sigma_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) - N \cdot e_y = 0. \end{cases}$$

Применение такой методики расчета позволяет выявить истинное напряженно-деформированное состояния сечений, состоящих из материалов с разными физико-

механическими характеристиками, учет которых в настоящее время основан на применении эмпирических правил и коэффициентов.

Так, например, прочность кладки в комплексных элементах с железобетоном уменьшается введением постоянного, не зависящего от объемного соотношения кладки и железобетона, коэффициента 0,85; в комплексных и внецентренно сжатых армокаменных элементах вводятся ограничения по проценту продольного армирования, к расчетному сопротивлению арматуры вводятся коэффициенты условий работы. Указанные мероприятия необходимы для учета неполного использования прочностных свойств кладки и арматуры, вызванного разными деформационными свойствами составляющих сечение сжатого элемента материалов. К тому же существующие методики расчета рассматривают лишь одну стадию работы – стадию разрушения, не позволяя оценить напряженно-деформированное состояние сжатых элементов на других стадиях.

На рисунках 3 и 4 в качестве примера показаны отдельные результаты расчета сопротивления сжатию сечений элементов из каменной кладки с продольным армированием и комплексных элементов из кладки с железобетонным сердечником. Предлагаемая методика, учитывающая истинные деформационные свойства составляющих сечение материалов, позволяет выявить неполное использование прочностных свойств арматуры, каменной кладки и проводить расчеты без введения эмпирических коэффициентов. В частности, напряжения в арматуре в предельной стадии по прочности составили для внецентренно сжатого и комплексного элемента при превышении процента армирования 184 МПа (при пределе текучести 283 МПа) и 238 МПа (при пределе текучести 360 МПа) соответственно; в комплексном элементе из-за большей деформативности напряжения в каменной кладке составили 3,8 МПа при пределе прочности 4,2 МПа.

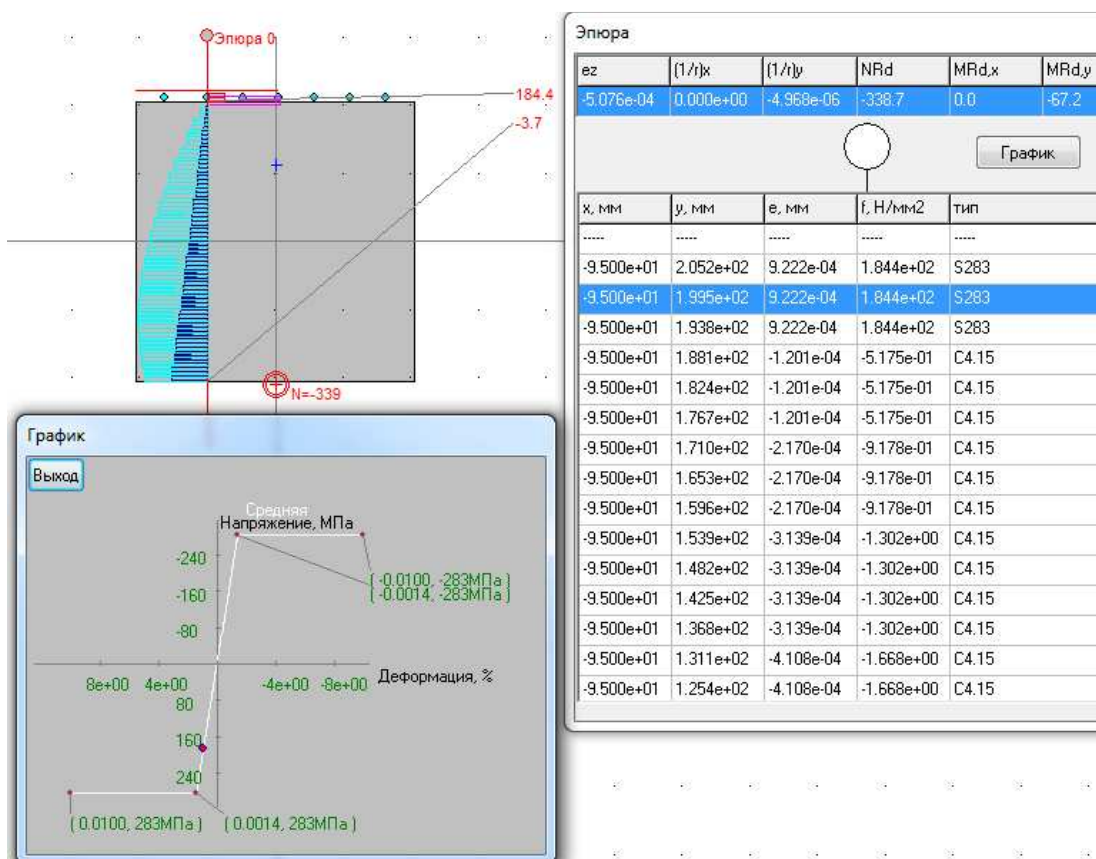


Рисунок 3. – Распределение напряжений в поперечном сечении сжатого армокаменного с продольным армированием элемента, напряжения в продольной арматуре в предельной стадии по прочности

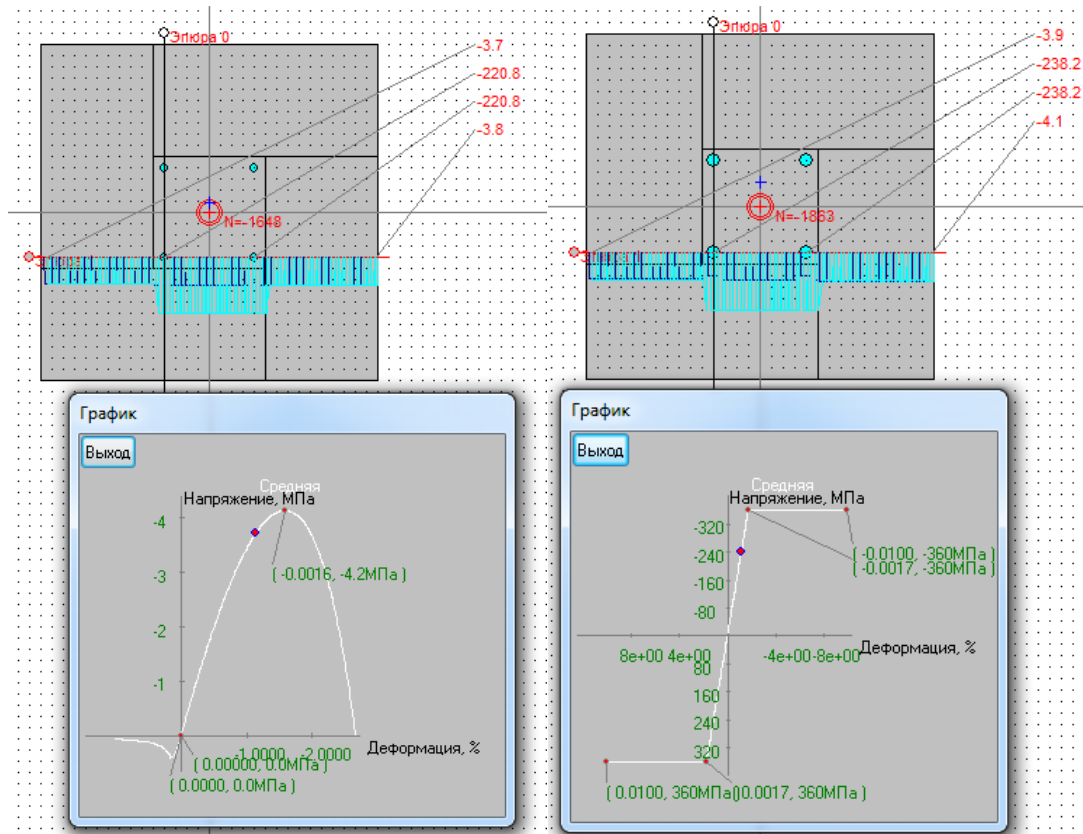


Рисунок 4. – Распределение напряжений в сечениях сжатых комплексных элементов, напряжения в кирпичной кладке и продольной арматуре в предельной стадии по прочности

Заключение. Методика расчета сопротивления сжатию, основанная на положениях общей деформационной модели, позволяет определять параметры напряженно-деформированного состояния нормальных к продольной оси сечений каменных и армокаменных элементов на любом этапе нагружения, учитывая при этом физическую нелинейность деформирования исходных материалов в виде каменной кладки, арматуры, бетона и др. За критерий разрушения в предельной стадии рекомендуется принимать максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором сходятся уравнения равновесия, благодаря чему исключается необходимость нормирования параметра предельной сжимаемости, появляется возможность учета полного перераспределения усилий в сечении каменных и армокаменных элементов, состоящих из двух и более материалов с различными физико-механическими характеристиками, в т.ч. усиленных в процессе эксплуатации

ЛИТЕРАТУРА

1. Hilsdorf, H.K. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression / H.K. Hilsdorf // Designing, engineering and constructing with masonry products. Gulf Publishing Company. – 1969. – P. 34–41.
2. Flohrer, C. Strength and Deformation Characteristics of Masonry with Fiber Reinforced Mortar Joints / C. Flohrer, H.K. Hilsdorf // Proceedings of the Fifth International Brick Masonry Conference, Washington, D.C., U.S.A., October 5–10, 1979 / Brick Institute of America; Advisors : C.T. Grimm [et al.]. – Washington, 1979. – P. 155–162.
3. Pöschel, G. Ein theoretisches Modell zum Tragverhalten von Elbsandsteinmauerwerk / G. Pöschel, A. Sabha // In: Wenzel F. (ed.) Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke. – 1996. – SFB 315. – P. 111–118.

4. Пангаев, В.В. Развитие расчетно-экспериментальных методов исследования прочности кладки каменных конструкций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.01 / В.В. Пангаев ; Новосиб. гос. архитектурно-строительный ун-т (Сибстрин). – Новосибирск, 2009. – 35 с.
5. Кашеварова, Г.Г. Натурные и численные эксперименты, направленные на построение зависимости напряжения от деформации кирпичной кладки / Г.Г. Кашеварова, М.Л. Иванов // Приволж. науч. вестн. – 2012. – № 8 (12). – С. 10–15.
6. Кашеварова, Г.Г. Моделирование процесса разрушения кирпичной кладки / Г.Г. Кашеварова, А.Ю. Зобачева // Вестн. Перм. нац. исслед. политехн. ун-та. Строительство и архитектура. – 2010. – № 1. – С. 106–116.
7. Гениев, Г.А. О критериях прочности ортотропного материала типа каменной кладки при плоском напряженном состоянии / Г.А. Гениев, А.Н. Воронов // Труды ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Исследование и методы расчета строительных конструкций. – 1985. – С. 94–101.
8. Гениев, Г.А. О критерии прочности каменной кладки при плоском напряженном состоянии / Г.А. Гениев // Строительная механика и расчет сооружений. – 1979. – № 2. – С. 7–11.
9. Page, A.W. The biaxial compressive strength of brick masonry / A.W. Page // Proceedings of Institution of Civil Engineers, Part 2. – 1981. – Vol. 71, Sept. – P. 893–906.
10. Lishak, V.I. 2-D Orthotropic failure criteria for masonry / V.I. Lishak, V.I. Yagust, D.Z. Yankelevsky // Engineering Structures. – 2007. – № 36. – P. 360–371.
11. Каменные и армокаменные конструкции : СНиП II-22-81*. – Введ. 31.11.81. – М. : Стройиздат, 1983. – 40 с.
12. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81) : утв. 15.08.1985. – М. : (ЦИТП) Госстроя СССР, 1989. – 149 с.
13. Еврокод 6. Проектирование каменных конструкций. Ч. 1-1 : Общие правила для армированных и неармированных конструкций : СТБ EN 1996-1-1-2008. – Введ. 1.07.2009. – Минск : Госстандарт, 2009. – 128 с.
14. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования : ТКП 45-5.03-308-2017 (33020). – Введ. 01.01.2018. – Минск : Минстройархитектуры, 2017. – 112 с.
15. Беленцов, Ю.А. Усиление каменных стен и простенков с учетом упругопластической работы каменной кладки реконструируемых жилых зданий : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Ю.А. Беленцов ; Петерб. гос. ун-т путей сообщения. – СПб., 2001. – 24 с.
16. Хаткевич, А.М. Метод расчета прочности нормальных к продольной оси сечений конструкций из каменной кладки с учетом диаграмм деформирования / А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 45–53.
17. Глухов, Д.О. Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси / Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 73–79.
18. Лазовский, Д.Н. Расчет сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности / Д.Н. Лазовский, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F. – 2017. – № 16. – С. 41–50.