

РАСЧЕТНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ИХ МАТЕРИАЛОВ

А. М. ХАТКЕВИЧ

канд. техн. наук, заведующий кафедрой строительных конструкций
Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой
г. Новополоцк, Республика Беларусь

Аннотация. Статья посвящена учету физической нелинейности материалов коротких армокаменных элементов при вычислении их расчетных значений сопротивления сжатию в рамках проверок предельного состояния несущей способности. Приведены графическое изображение и вариант аналитического описания расчетных диаграмм деформирования неармированной кладки и кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах.

На примере короткого армокаменного элемента с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах и короткого армокаменного элемента с продольным армированием приведены вычисления расчетных значений сопротивления сжатию.

Вычисленные значения сопоставлены с аналогичными значениями, определенными по действующим нормам проектирования. Результаты расчетов и сравнения подтверждают возможность применения методики, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов, для вычисления расчетных значений сопротивления сжатию коротких армокаменных элементов в соответствии с действующими нормами проектирования.

Ключевые слова: армокаменный элемент, физическая нелинейность, диаграмма деформирования, методика расчета, несущая способность, расчетное значение, нормы проектирования.

CALCULATED VALUES OF COMPRESSION RESISTANCE OF REINFORCED STONE ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT THE PHYSICAL NONLINEARITY OF THEIR MATERIALS

A. KHATKEVICH

PhD in engineering, Head of the Department of Building Structures
Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk
Novopolotsk, Republic of Belarus

Abstract. The article is devoted to taking into account the physical nonlinearity of materials of short reinforced stone elements when calculating their calculated values of compression resistance in the framework of checks of the limiting state of the bearing capacity. A graphic image and a variant of the analytical description of the calculated deformation diagrams of non-reinforced masonry and masonry with transverse reinforcement in horizontal mortar joints are presented.

Using the example of a short reinforced stone element with transverse reinforcement with grids in horizontal mortar joints and a short reinforced stone element with longitudinal reinforcement, the calculated values of compression resistance are given.

The calculated values are compared with similar values determined according to the current design standards. The results of calculations and comparisons confirm the possibility of using a technique that takes into account the physical nonlinearity of the deformation of materials to calculate the calculated values of the compression resistance of short reinforced stone elements in accordance with the current design standards.

Keywords: armoured stone element, physical nonlinearity, deformation diagram, calculation method, bearing capacity, calculated value, design standards.

Введение.

В [1–3] предложена методика расчета коротких армокаменных элементов, подверженных сжатию, учитывающая физическую нелинейность деформирования их материалов в виде «фактических» диаграмм деформирования. Учет физической нелинейности является важным шагом

в повышении точности расчетных моделей, что отмечалось в [4; 5]. При проектировании армокаменных элементов в Республике Беларусь следует руководствоваться действующими нормами СП 5.02.01-2021 [6] в соответствии с которыми для проверки предельного состояния несущей способности определяются *расчетные значения сопротивления сжатию армокаменных элементов* и сравниваются с расчетными значениями продольного сжимающего усилия.

В данной работе рассмотрена возможность учета физической нелинейности материалов армокаменных элементов при вычислении их расчетных значений сопротивления сжатию, приведены варианты аналитического описания расчетных диаграмм деформирования неармированной кладки и кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах, отсутствующие в нормах проектирования.

Физическая нелинейность материалов армокаменных элементов.

Для учета физической нелинейности неармированной каменной кладки и кладки с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах в составе коротких армокаменных элементов при определении расчетных значений сопротивления сжатию N_{Rdu} предлагается принимать параболически-линейные диаграммы деформирования, графическое изображение которых приведено на рис. 1.

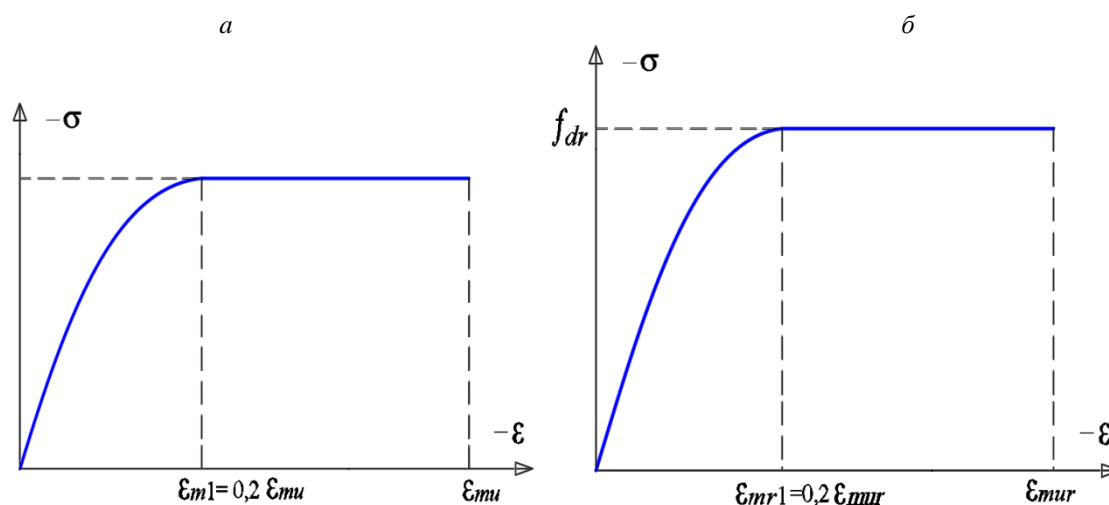


Рисунок 1 – Идеализированные расчетные параболически-линейные диаграммы деформирования:

- a* – диаграмма деформирования неармированной каменной кладки;
- б* – диаграмма деформирования кладки с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах

Аппроксимация расчетной диаграммы деформирования « σ – ε » неармированной каменной кладки:

$$\begin{cases} \sigma = \left[2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m1}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{m1}} \right)^2 \right] \cdot f_d & \text{при } |\varepsilon| < |\varepsilon_{m1}|; \\ \sigma = f_d & \text{при } |\varepsilon_{m1}| \leq |\varepsilon| \leq |\varepsilon_{mu}|, \end{cases} \quad (1)$$

где ε_{m1} – относительные деформации сжатия в вершине параболического участка диаграммы;

f_d – расчетное значение прочности неармированной каменной кладки при сжатии;

ε_{mu} – предельные относительные деформации сжатия.

Значения ε_{mu} и f_d на диаграммах деформирования и в (1) принимаются согласно [6]. В частности, для кладочных изделий 1-й группы ε_{mu} составляет – 0,0035, значения f_d , вычисляются делением характеристической прочности на частный коэффициент для кладки γ_M .

Аппроксимация расчетной диаграммы деформирования кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах:

$$\begin{cases} \sigma = \left(2 \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mr1}} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{mr1}} \right)^2 \right) \cdot f_{dr} & \text{при } |\varepsilon| < |\varepsilon_{mr1}|; \\ \sigma = f_{dr} & \text{при } |\varepsilon| \leq |\varepsilon_{mu}|, \end{cases} \quad (2)$$

где ε_{mr1} – относительные деформации сжатия в вершине параболического участка диаграммы деформирования;

f_{dr} – расчетное значение прочности кладки с поперечным армированием сетками в горизонтальных швах при сжатии;

ε_{mur} – предельные относительные деформации сжатия.

Значения относительных деформаций сжатия на диаграмме деформирования кладки с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах:

$$\begin{cases} \varepsilon_{mur} = \varepsilon_{mu} \frac{f_{dr}}{f_d} \leq 1,5 \cdot \varepsilon_{mu}; \\ \varepsilon_{mr1} = 0,2 \cdot \varepsilon_{mur}. \end{cases} \quad (3)$$

Ординату f_{dr} идеализированной диаграммы предлагается определять по формуле:

$$f_{dr} = f_d + \frac{K \cdot \mu \cdot f_{yd}}{100} \leq 2 f_d, \quad (4)$$

где f_d – расчетное значение прочности неармированной кладки при сжатии;

f_{yd} – расчетное значение прочности при растяжении арматурной стали.

Коэффициент эффективности поперечного армирования K в формуле (4) предлагается принимать согласно табл. 1. В данной таблице для сеток из плоских спиралей и плетеных сеток из проволоки диаметром до 2 мм включительно даны повышенные значения коэффициента K . Возможность использования повышенных значений коэффициента K подтверждается экспериментальными исследованиями.

Таблица 1 – Рекомендуемые значения коэффициента эффективности поперечного армирования K

Кладочные изделия	Вид сеток армирования	K
Керамические пластического прессования, силикатные, бетонные (тяжелый бетон). Общий объем пустот и объем отдельной пустоты $\leq 12,5\%$	Из перекрестных стержней, соединенных контактно-точечной сваркой	2
	В виде плоских спиралей	2,25
	Плетеные сетки с диаметром арматуры до 2 мм при обеспечении защиты от коррозии на проектный срок эксплуатации	2,25
Керамические полнотелые полусухого прессования	Из перекрестных стержней, соединенных контактно-точечной сваркой	2
	В виде плоских спиралей	2,25

Для учета физической нелинейности продольной стальной арматуры в составе коротких армокаменных элементов при определении расчетных значений сопротивления сжатию принимается идеализированная диаграмма идеального упругопластического тела с ограничением площадки текучести согласно [7].

Расчет сжатого короткого армокаменного элемента с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах.

Принимаем для расчета следующие исходные данные:

– поперечное сечение элемента в виде столба (простенка) $b \times t = 2 \times 2$ кирпича (510×510 мм);

– кладка выполнена из керамических изделий 1-й группы с приведенной прочностью при сжатии $f_b = 20$ МПа на стандартном кладочном растворе заданного качества М10. Класс контроля выполнения работ – I;

– армирование горизонтальных швов кладки выполнено сетками из перекрестных стержней с шагом s по высоте через два ряда кладки ($2 \times (65 + 12) = 154$ мм);

– сетки выполнены из арматурной стали $\varnothing 4$ мм ($A_{sa} = 12,6$ мм²) с расчетным значением прочности на растяжение $f_{yd} = 350$ МПа;

– расстояние между стержнями арматурной сетки $a_1 = a_2 = 90$ мм.

Расчет по методике [6]:

– расчетное значение сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах вычисляется в соответствии с п. 9.1.2 [6]. При этом вместо расчетного значения прочности при сжатии неармированной каменной кладки f_d принимают расчетное значение прочности при сжатии армированной каменной кладки по п. 9.7.5.3 f_{dr} :

$$N_{Rdu,1} = \Phi \cdot b \cdot t \cdot f_{dr} \quad (5)$$

– характеристическая прочность кладки по табл. 6.4 [6] с учетом наличия продольного шва $f_k = 0,8 \times 6,5 = 5,2$ МПа;

– значение частного коэффициента для кладки на растворе заданного качества для класса контроля выполнения работ I по табл. 5.1 [6] составляет $\gamma_M = 1,7$;

– расчетная прочность кладки $f_d = f_k / \gamma_M = 5,2 / 1,7 = 3,06$ МПа;

– процент армирования кладки

$$\frac{A_{sa} \cdot (a_1 + a_2)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s} 100\% = \frac{12,6 \cdot (90 + 90)}{90 \cdot 90 \cdot 154} 100\% = 0,18\% \geq 0,1\% ; \quad (6)$$

– коэффициент уменьшения сопротивления сжатию сечения Φ , учитывающий эксцентриситет приложения нагрузки вычисляется согласно п. 9.1.2.8 [6];

– расчетное значение прочности при сжатии армированной каменной кладки f_{dr} по п. 9.7.5.3 [6] и расчетное значение сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента $N_{Rdu,1}$ приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Сравнение значений N_{Rdu} короткого армокаменного элемента с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах по [6] и по методике, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов [1–3]

e_0	Φ	f_{dr} (МПа)	$N_{Rdu,1}$ (кН)	$N_{Rdu,2}$ (кН)	$\left \frac{N_{Rdu,1} - N_{Rdu,2}}{N_{Rdu,1}} \right \cdot 100\%$
0	1	4,32	1124	1131	0,62
0,05·h	0,9	4,07	952	947	0,53
0,1·h	0,8	3,82	794	797	0,38
0,15·h	0,7	3,56	649	651	0,31
0,2·h	0,6	3,31	517	519	0,39

h – размер поперечного сечения элемента в плоскости изгиба

Расчет по методике, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов [1–3]:

– расчетное значение прочности при сжатии армированной каменной кладки с учетом предпосылки гомогенизации, в рамках которой кладка рассматривается в виде единой среды, принимается таким же, как вычислено ранее в табл. 2;

– диаграмма деформирования кладки принимается в виде параболически-линейного графика. В частности, с учетом принятых кладочных материалов деформации неармированной кладки составляют $\varepsilon_{mi} = -3,5\%$. Деформации кладки с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах

$$\varepsilon_{mur} = \varepsilon_{mi} \times f_{dr}/f_d = -3,5 \times 4,32/3,06 = -4,94\% < 1,5 \varepsilon_{mi}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_{mr1} = 0,2 \times \varepsilon_{mur} = 0,2 \times 4,94 = -0,99\%. \quad (8)$$

Результаты вычисления расчетных значений сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах $N_{Rdu,2}$ в программе «Beta_K», реализующий деформационный подход к расчетам поперечных сечений, приведены в табл. 2.

Примеры напряженно-деформированного состояния поперечного сечения в предельной стадии по прочности при эксцентриситетах $0,05 \cdot h$ и $0,2 \cdot h$ показаны на рис. 2.

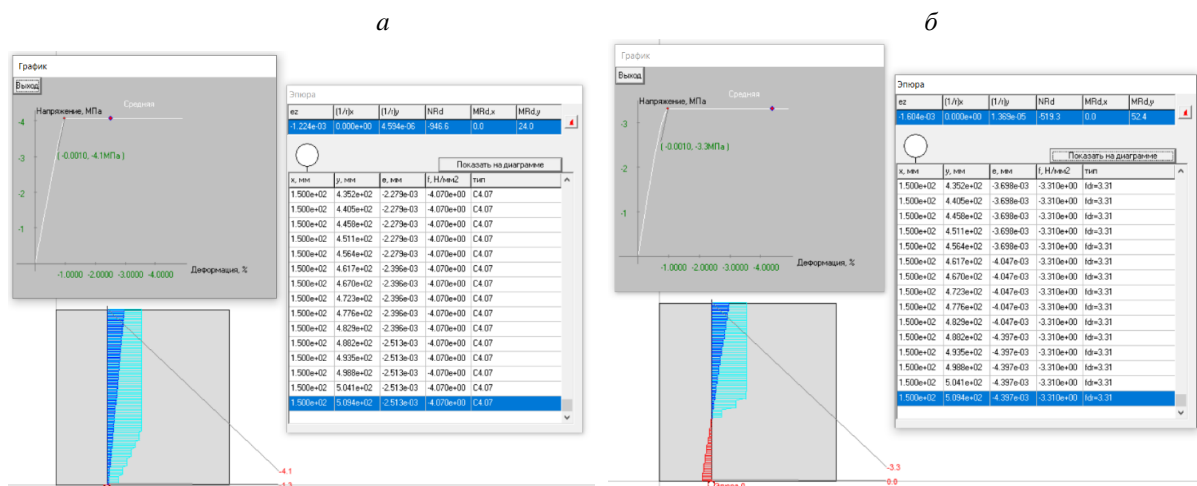


Рисунок 2 – Расчетное напряженно-деформированное состояние в поперечном сечении в предельной стадии по прочности, деформации кладки со стороны наиболее сжатой грани сечения:
 а – при эксцентриситете $e_0 = 0,05 \cdot h$; б – при эксцентриситете $e_0 = 0,2 \cdot h$

Расчет сжатого короткого армокаменного элемента с продольным армированием.

Принимаем для расчета следующие исходные данные:

- поперечное сечение короткого армокаменного элемента в виде столба (простенка) $b \times h = 1,5 \times 2,5$ кирпича (380×640 мм);
- каменная кладка выполнена из керамических изделий 1-й группы с приведенной прочностью при сжатии $f_b = 30$ МПа на стандартном кладочном растворе заданного качества М10. Класс контроля выполнения работ – I;
- продольное армирование выполнено на расстоянии $c = 50$ мм от растянутой грани, рабочая высота сечения $d = h - c = 640 - 50 = 590$ мм;
- продольное армирование выполнено стержневой арматурой $\varnothing 10, 12, 14, 16, 18$ и 20 мм с расчетным значением прочности на растяжение $f_{yd} = 450$ МПа;
- эксцентриситет приложения продольного усилия $e_0 = 1,5$ м.

Расчет по методике [6]:

- расчетная схема деформаций и усилий в сечении короткого армокаменного элемента при внецентренном сжатии показана на рис. 3;

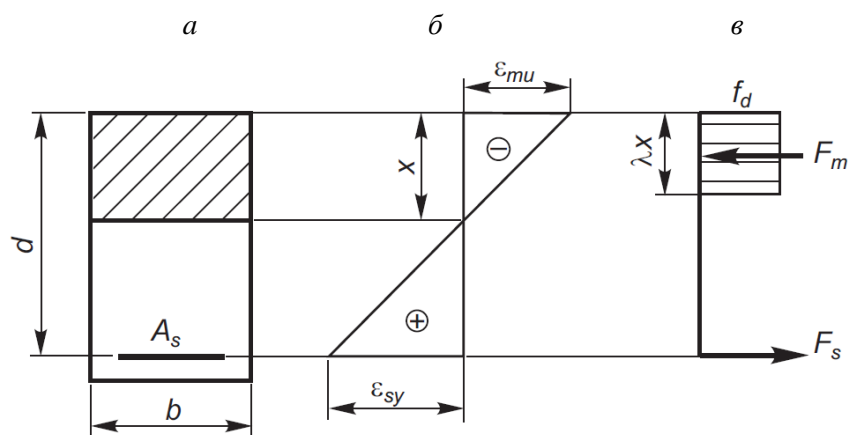


Рисунок 3 – Расчетная схема поперечного сечения изгибаемого и (или) сжатого армированного элемента [6, с. 58]:

a – поперечное сечение; *б* – эпюра деформаций; *в* – эпюра напряжений сжатия и схема расчетных усилий; F_s – растягивающее усилие в арматуре; F_m – равнодействующая сжимающего усилия в каменной кладке для прямоугольной эпюры напряжений

- характеристическая прочность кладки по табл. 4.7 [6] с учетом наличия продольного шва $f_k = 0,8 \times 8,6 = 6,88$ МПа;
- значение частного коэффициента для кладки на растворе заданного качества для класса контроля выполнения работ I по табл. 5.1 [6] $\gamma_M = 1,7$;
- расчетная прочность кладки $f_d = f_k / \gamma_M = 6,88 / 1,7 = 4,05$ МПа;
- минимальный процент армирования согласно п. 12.2.3.1 составляет 0,05 % расчетной площади (т. е. $0,05 \times b \times d / 100 = 112,1$ мм²);
- плечо z внутренних усилий в растянутой арматуре и сжатой зоне сечения по п. 9.6.2.4 [6]

$$z = d \cdot \left(1 - 0,5 \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_d} \right) \leq 0,95d ; \quad (9)$$

– из уравнения равновесия внутренних и внешних усилий расчетное значение сопротивления сжатию $N_{Rdu,1}$ по [6]

$$N_{Rdu,1} = N_u = \frac{A_s \cdot f_{yd} \cdot z}{e_0 + h / 2 - c - z} ; \quad (10)$$

– результаты вычислений значений сопротивления сжатию $N_{Rdu,1}$ по [6] приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Сравнение значений N_{Rdu} короткого армокаменного элемента с продольным армированием по [6] и по методике, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов [1–3]

Продольное армирование	A_s (мм ²)	z (мм)	$N_{Rdu,1}$ (кН)	$N_{Rdu,2}$ (кН)	$\left \frac{N_{Rdu,1} - N_{Rdu,2}}{N_{Rdu,1}} \right \cdot 100\%$
2Ø 10 мм	157	560,5	32,7	32,5	0,73
2Ø 12 мм	226	557,0	46,7	45,3	2,99
2Ø 14 мм	308	545,0	61,7	59,7	3,18
2Ø 16 мм	402	531,2	77,6	74,8	3,58
2Ø 18 мм	509	515,6	94,1	89,7	4,72
2Ø 20 мм	628	498,2	110,7	103,7	6,32

Расчет по методике, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов [1–3]:

- характеристическая прочность кладки и расчетное значение прочности при сжатии каменной кладки принимается как было оговорено ранее $f_d = f_k / \gamma_M = 6,88 / 1,7 = 4,05$ МПа;
- диаграмма деформирования кладки принимается в виде параболически-линейного графика;
- предельные деформации неармированной кладки $\epsilon_{mu} = -3,5$ ‰;
- деформации кладки, соответствующие переходу на линейный участок диаграммы $\epsilon_{m1} = 0,2 \cdot \epsilon_{mu} = -0,2 \times 3,5 = -0,7$ ‰.

Результаты вычисления расчетных значений сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах $N_{Rd,2}$ в программе «Beta_K», реализующий деформационный подход к расчетам поперечных сечений, приведены в табл. 3.

Пример напряженно-деформированного состояния поперечного сечения в предельной стадии по прочности для поперечного сечения с продольным армированием при эксцентриситете $0,05 \cdot h$ показан на рис. 4.

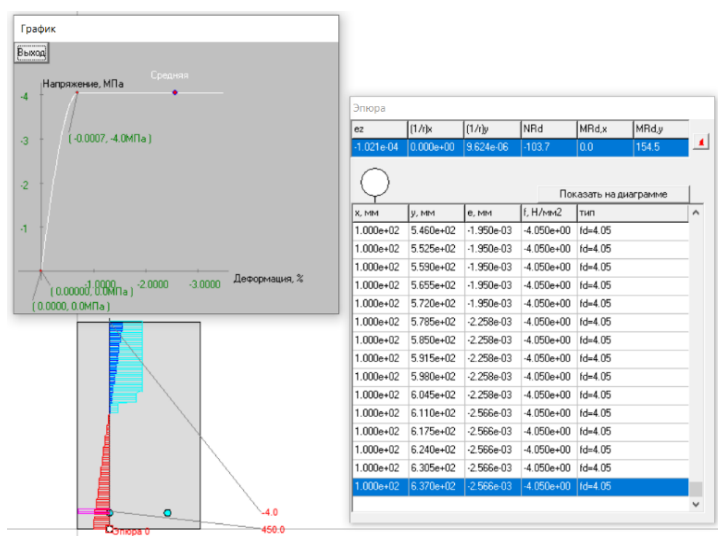


Рисунок 4 – Расчетное напряженно-деформированное состояние в поперечном сечении в предельной стадии по прочности короткого армокаменного элемента, деформации кладки со стороны наиболее сжатой грани сечения

Выводы.

Результаты расчетов и выполненного в табл. 2 и 3 сравнения подтверждают возможность применения предложенной в [1–3] методики, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов, в том числе и для вычисления *расчетных значений сопротивления сжатию* коротких армокаменных элементов в соответствии с нормами проектирования СП 5.02.01-2021 «Каменные и армокаменные конструкции» для *проверки предельных состояний несущей способности*.

Литература:

1. Глухов, Д. О. Метод расчета прочности сжатых каменных элементов по сечениям, нормальным к продольной оси / Д. О. Глухов, А. М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2016. – № 8. – С. 73–79.
2. Лазовский, Д. Н. Расчет сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности / Д. Н. Лазовский, А. М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2017. – № 16. – С. 41–50.
3. Лазовский, Д. Н. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов / Д. Н. Лазовский, А. М. Хаткевич // Вестник МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 12. – С. 1638-1652. – DOI 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652. – EDN AVBGUW.

4. Карпенко Н. И., Соколов Б. С., Радайкин О. В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета : монография. М. : Изд-во АСВ, 2019. – 194 с.
5. Соколов Б. С., Антаков А. Б. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории // Строительные материалы. 2019. – № 9. – С. 51–55. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
6. СП 5.02.01-2021. Каменные и армокаменные конструкции. Взамен ТКП 45-5.02-308-2017 (33020) : введен 01.04.2021. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2021. – 116 с.
7. СП 5.03.01-2020 Бетонные и железобетонные конструкции ; введен 16.09.2020 г. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2022. – 236 с.