

СТРОИТЕЛЬСТВО

УДК 624.07

DOI 10.52928/2070-1683-2023-34-2-2-9

**ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫЧИСЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ
СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ
В РАМКАХ ПРОВЕРКИ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ**

канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ¹), д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ²),
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ³), канд. техн. наук Э. ЧАПРАНГАНДА⁴)
(¹), ²)Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
³)ООО «СофтКлуб», Минск, ⁴)Ботсванский международный университет науки и технологий)
¹)a.khatkevich@psu.by, ²)d.lazovski@psu.by, ³)d.gluhov@psu.by, ⁴)katsvikisire@gmail.com

Статья посвящена методу вычисления расчетных значений сопротивления сжатию в рамках проверки предельного состояния несущей способности коротких каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности их материалов. Приведены предложения по графическому изображению и аналитическому описанию расчетных диаграмм деформирования неармированной кладки и кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах.

На примере коротких неармированного, армокаменных с поперечным и с продольным армированием элементов с учетом предложений по диаграммам деформирования проведены вычисления расчетных значений сопротивления сжатию. Вычисленные значения сопоставлены с аналогичными значениями, определенными по действующим нормам проектирования. Результаты проведенных расчетов и сравнения подтвердили возможность применения предложенных аппроксимаций диаграмм и методики расчета, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов, для вычисления расчетных значений сопротивления сжатию коротких каменных и армокаменных элементов.

Ключевые слова: физическая нелинейность, диаграмма деформирования, методика расчета, предельное состояние, расчетное значение сопротивления сжатию, деформационный подход.

Введение. Учет нелинейности при проектировании зданий и сооружений является важным направлением, служащим приближению расчетных моделей к действительной работе конструкций и, соответственно, повышению точности проводимых расчетов, что напрямую влияет на безопасность и экономичность проектных решений. В области учета нелинейности конструкций из каменных кладок известны работы [1–6], авторами которых изложена проблематика данного вопроса и рассматривались пути решения с позиций теории силового сопротивления анизотропных материалов сжатию, с нахождением критериев прочности в технической деформационной теории пластичности и других подходов.

Нами [7] также рассматривалась необходимость и возможность применения *деформационного подхода* для расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов, учитывающего физическую нелинейность деформирования материалов в виде неармированной каменной кладки, кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах и продольной стальной арматуры за счет использования «фактических» диаграмм деформирования и уравнений равновесия внутренних и внешних усилий. Такой подход позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния сжатых элементов на любой стадии работы под нагрузкой, а сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными показало хорошую сходимость.

Разработка проектной документации на возведение, ремонт, реконструкцию, модернизацию и реставрацию зданий и сооружений должна сопровождаться проверками предельного состояния несущей способности и выполняться в соответствии с СН 2.01.01-2022¹, который допускает три метода: полностью вероятностный; метод, основанный на результатах испытаний; метод частных коэффициентов. Первые два являются достаточно трудоемкими в использовании и наибольшее применение традиционно находит метод частных коэффициентов.

¹ СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 60 с.

Так, в соответствии с СП 5.02.01-2021² проверку предельного состояния несущей способности каменных и армокаменных элементов выполняют сравнением расчетного значения продольного сжимающего усилия N_{Ed} с расчетным значением сопротивления сжатию N_{Rd} , которое вычисляется с учетом следующих условий:

- поперечные сечения конструкций после приложения нагрузки остаются плоскими (гипотеза плоских сечений);
- значения относительных деформаций арматуры равны значениям относительных деформаций прилегающей каменной кладки или материалов заполнения (кладочного раствора или бетона), то есть соблюдается совместная работа продольной стальной арматуры с кладкой и материалами заполнения;
- прочность на растяжение каменной кладки перпендикулярно горизонтальным растворным швам не учитывается;
- диаграмму деформирования каменной кладки принимают параболической или параболически-линейной;
- предельное значение относительных деформаций укорочения ε_{mu} наиболее сжатой грани сечения каменной кладки не должно превышать 3,5‰ для кладочных изделий группы 1 и 2,0‰ для группы 2;
- диаграмма деформирования продольной стальной арматуры назначается по СП 5.03.01-2020³, значение предельных деформаций ε_{sy} принимают по виду арматуры, как правило, оно не должно превышать 10‰;
- форма эпюры распределения расчетных сжимающих напряжений для каменной кладки или материалов заполнения – прямоугольная.

Указанные положения позволяют применить общий метод [7] к вычислению расчетных значений сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов N_{Rd} для проверок предельного состояния несущей способности, что и является целью данного исследования.

Диаграммы деформирования (состояния) кладки. Для неармированной каменной кладки расчетная параболически-линейная диаграмма принимается в соответствии с СП 5.02.01-2021, предельные значения деформаций укорочения в вершине параболического участка диаграммы ε_{m1} для каменной кладки из кладочных изделий 1-й группы – 2,0‰, для каменной кладки из кладочных изделий 2-й группы – ε_{mu} .

Аппроксимацию расчетной диаграммы деформирования « $\sigma - \varepsilon$ » неармированной каменной кладки, отсутствующую в СП 5.02.01-2021, предлагается принимать в виде:

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

где f_d – расчетное значение прочности неармированной каменной кладки при сжатии. Значение f_d вычисляется делением характеристической прочности f_k на частный коэффициент для кладки γ_M .

Возможность учета физической нелинейности кладки с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах в СП 5.02.01-2021 не рассматривается. В связи с этим предлагается диаграмму деформирования такой кладки принимать аналогичной формы с диаграммой неармированной кладки в виде параболически-линейного графика с ее аппроксимацией в виде:

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

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, определяемое по СП 5.02.01-2021;

ε_{mur} – предельные относительные деформации сжатия кладки с поперечным армированием.

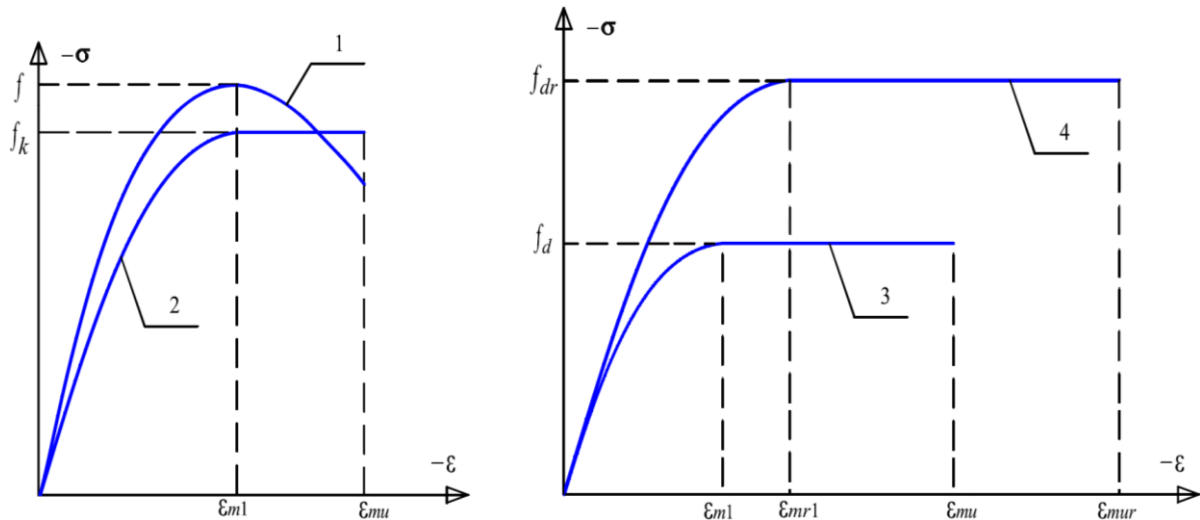
В (2) значения относительных деформаций предлагается определять:

$$\begin{cases} \varepsilon_{mur} = \varepsilon_{mu} \frac{f_{dr}}{f_d}; \\ \varepsilon_{mr1} = 0,6 \cdot \varepsilon_{mur}. \end{cases} \quad (3)$$

² СП 5.02.01-2021. Каменные и армокаменные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2021. – 116 с.

³ СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 236 с.

Графическое изображение диаграмм деформирования (состояния) кладки приведено на рисунке 1.



1 – фактическая (параболическая) диаграмма; 2 – характеристическая (параболически-линейная) диаграмма; 3 – расчетная (параболически-линейная) диаграмма неармированной кладки; 4 – расчетная (параболически-линейная) диаграмма кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах

Рисунок 1. – Диаграммы деформирования кладки

Методика расчета [7] заключается в совместном использовании уравнений равновесия, условий распределения относительных деформаций в соответствии с гипотезой плоских сечений и рассмотрении поперечного сечения каменного (армокаменного) элемента в виде совокупности k элементарных площадок (слоев) с площадью i -й площадки (слоя) A_{mi} , в поперечном сечении может располагаться n стержней продольной стальной арматуры с площадью сечения A_{sj} . В пределах элементарных площадок (слоев) нормальные напряжения σ считаются равномерно распределенными, равными среднему значению напряжений на границах площадок (слоев). Продольное усилие N действует на расстоянии e_y и e_x от центра тяжести сечения. Распределение относительных деформаций ε_z по поперечному сечению принимается линейным, тогда разрешающие уравнения для общего случая внецентренного сжатия принимают вид:

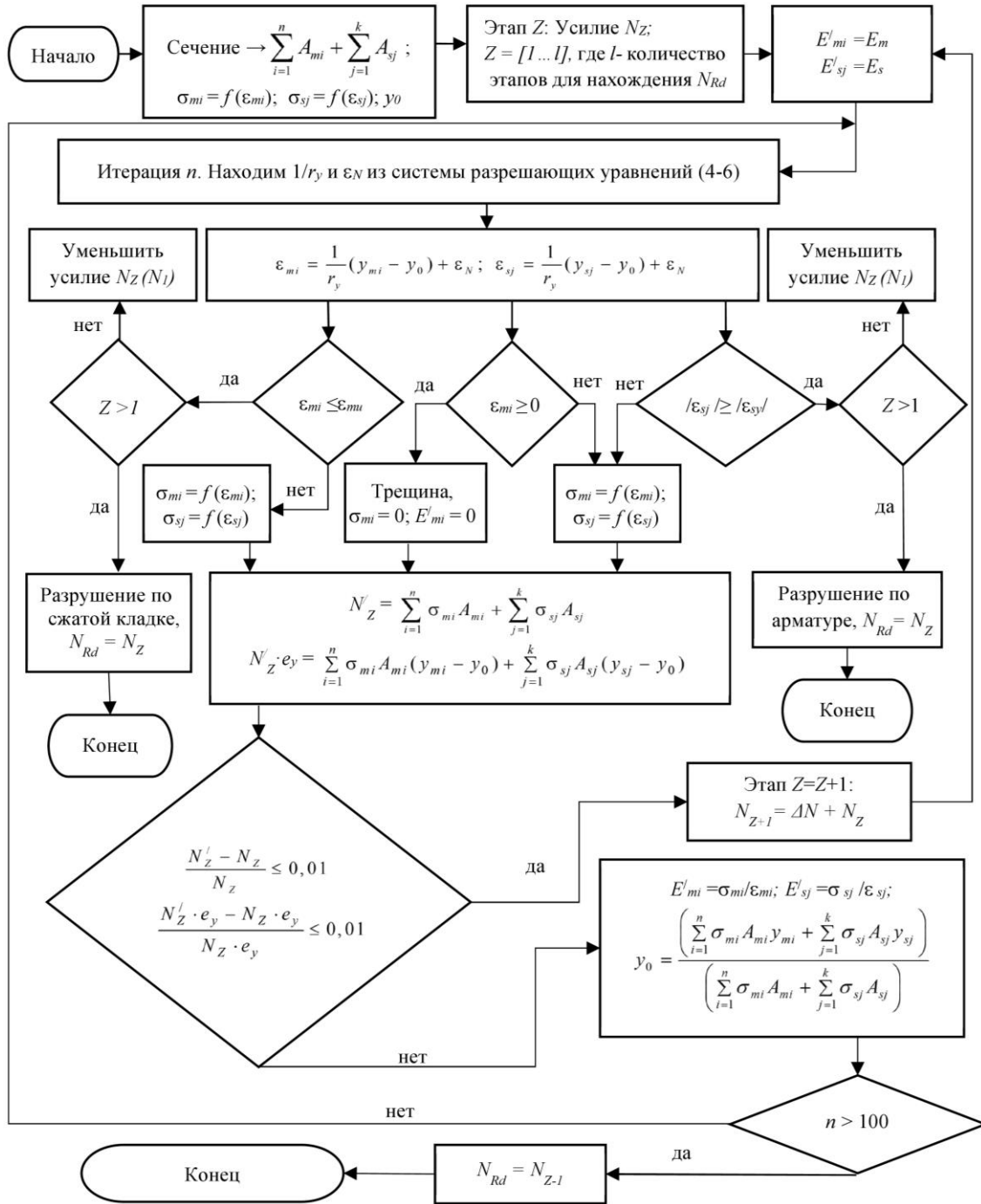
$$\varepsilon_N \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} \right) + \frac{1}{r_x} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) \right) + \frac{1}{r_y} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) - N = 0; \quad (4)$$

$$\varepsilon_N \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0) \right) + \frac{1}{r_x} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (x_{sj} - x_0)^2 \right) + \frac{1}{r_y} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)(x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)(x_{sj} - x_0) \right) - Ne_x = 0; \quad (5)$$

$$\varepsilon_N \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) + \frac{1}{r_x} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)(x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)(x_{sj} - x_0) \right) + \frac{1}{r_y} \left(\sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj} A_{sj} (y_{sj} - y_0)^2 \right) - Ne_y = 0. \quad (6)$$

где ε_N – продольные относительные деформации на уровне центра тяжести сечения элемента;
 ε_{mi} , ε_{sj} – относительные деформации в i -й элементарной площадке и j -м стержне продольной стальной арматуры соответственно;
 $1/r_y$, $1/r_x$ – кривизна в плоскости оси y и x соответственно;
 y_{mi} , x_{mi} , y_{sj} , x_{sj} – координаты центра тяжести i -й элементарной площадки (слоя) и j -го стержня продольной стальной арматуры;
 y_0 , x_0 – координаты центра тяжести расчетного поперечного сечения.

В отличие от общей методики [7] при вычислении расчетного значения сопротивления сжатию N_{Rd} *принимается другой критерий расчета* – достижение предельных значений относительных деформаций кладки ϵ_{mi} (ϵ_{mur}) и/или продольной арматуры ϵ_{sj} , что отражается в алгоритмах расчета, реализованных в программе «Beta_K». Алгоритм вычисления расчетного значения сопротивления сжатию N_{Rd} каменного (армокаменного) элемента на примере простого внецентренного сжатия показан на рисунке 2.



E_m, E_s – модуль упругости кладки и арматуры соответственно

Рисунок 2. – Алгоритм методики вычисления расчетного значения N_{Rd} при простом внецентренном сжатии

Верификация методики выполнена сопоставлением вычисленных расчетных значений сопротивления сжатию $N_{Rd,1}$ по нормам СП 5.02.01-2021 и по описанной выше методике расчета с учетом применения предложенных аппроксимаций диаграмм $N_{Rd,2}$ на следующих характерных элементах:

- А1: неармированный элемент в виде простенка (участка стены), поперечное сечение $b \times t = 4 \times 2$ кирпича (1030×510 мм);

- А2: армокаменный элемент в виде столба (простенка) с армированием сетками в горизонтальных растворных швах, поперечное сечение $b \times t = 2 \times 2$ кирпича (510×510 мм);
- А3: армокаменный элемент в виде столба (простенка) с продольным армированием, поперечное сечение $b \times t = 1,5 \times 2,5$ кирпича (380×640 мм).

Материалы, используемые при верификации методики:

- каменная кладка всех элементов (А1-А3) выполнена из керамических изделий 1-й группы ($\varepsilon_{mu} = -3,5\%$; $\varepsilon_{m1} = -2,0\%$) с приведенной прочностью при сжатии $f_b = 30$ МПа на стандартном кладочном растворе заданного качества М10. Класс контроля выполнения работ – I, $\gamma_M = 1,7$. Характеристическая прочность кладки с учетом наличия продольного шва $f_k = 0,8 \times 8,6 = 6,88$ МПа. Расчетная прочность кладки $f_d = f_k / \gamma_M = 6,88 / 1,7 = 4,05$ МПа;
- армирование в горизонтальных растворных швах кладки элемента А2 выполнено сетками 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. Коэффициент армирования кладки:

$$\frac{A_{sa} \cdot (a_1 + a_2)}{a_1 \cdot a_2 \cdot s} = \frac{12,6 \cdot (90 + 90)}{90 \cdot 90 \cdot 154} = 0,0018 \geq 0,001; \quad (7)$$

- продольное армирование элемента А3 размещается на расстоянии $c = 50$ мм от растянутой грани, рабочая высота сечения $d = t - c = 640 - 50 = 590$ мм. Минимальный процент армирования составляет 0,05% расчетной площади сечения ($112,1$ мм²). Продольное армирование рассматриваем в виде стержневой арматуры в количестве 2 шт. $\varnothing 10, 12, 14, 16, 18$ и 20 мм с расчетным значением прочности на растяжение $f_{yd} = 450$ МПа; эксцентриситет приложения продольного усилия $e_0 = 1,5$ м.

Верификация методики. Расчетное значение сопротивления сжатию сечения неармированного элемента А1 в соответствии с СП 5.02.01-2021 вычислялось:

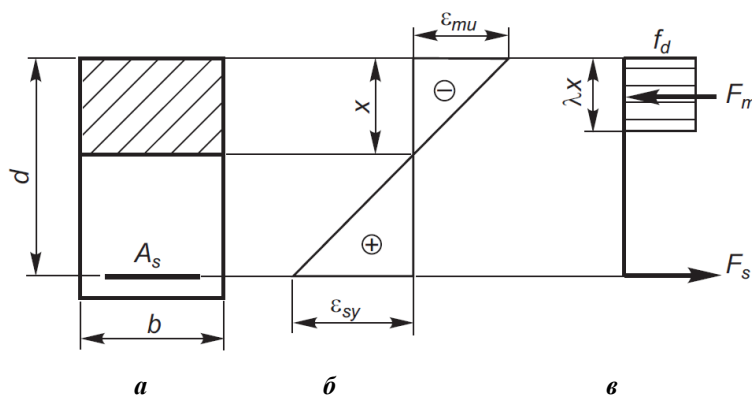
$$N_{rd,1} = \Phi \cdot b \cdot t \cdot f_d \cdot \quad (8)$$

Расчетное значение сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента А2 с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах в соответствии с СП 5.02.01-2021 вычислялось:

$$N_{rd,1} = \Phi \cdot b \cdot t \cdot f_{dr} \cdot \quad (9)$$

В (8) и (9) коэффициент уменьшения сопротивления сжатию сечения Φ , учитывающий эксцентриситет приложения нагрузки, определяется по (9.3)⁴.

Расчетная схема деформаций и усилий в сечении короткого армокаменного элемента при изгибе (внецентренном сжатии) по СП 5.02.01-2021 показана на рисунке 3.



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

Рисунок 3. – Расчетная схема поперечного сечения изгибаемого (внецентренно сжатого) армированного элемента [СП 5.02.01-2021, с. 58]

⁴ См. сноску 2.

Расчетное значение сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента А3 с продольным армированием можно получить из уравнения равновесия внутренних и внешних усилий:

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

где z – плечо внутренних усилий в растянутой арматуре и сжатой зоне сечения по расчетной схеме рисунка 3:

$$z = d \cdot \left(1 - 0,5 \frac{A_s \cdot f_{yd}}{b \cdot d \cdot f_d} \right) \leq 0,95d. \quad (11)$$

Для армокаменного элемента А3 с продольным армированием целесообразно рассмотреть помимо сжатия также и изгиб. Расчетное значение сопротивления изгибу $M_{Rd,1}$ в соответствии с СП 5.02.01-2021:

$$M_{Rd,1} = A_s \cdot f_{yd} \cdot z, \quad (12)$$

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

Расчетные значения сопротивления сжатию (изгибу) сечений элементов $N_{Rd,2}$ ($M_{Rd,2}$) по описанной методике расчета с учетом применения предложенных аппроксимаций диаграмм вычислены в программе «Beta_K». Результаты проведенных расчетов и сравнения показаны в таблицах 1–4.

Таблица 1. – Сравнение значений N_{Rd} неармированного элемента А1 по СП 5.02.01-2021 и по методике, учитывающей физическую нелинейность

e_0	Φ	$N_{Rd,1}$ (кН)	$N_{Rd,2}$ (кН)	$\left \frac{N_{Rd,1} - N_{Rd,2}}{N_{Rd,1}} \right \cdot 100\%$
0	1	2127,5	2110,3	0,81
$0,05 \cdot t$	0,9	1914,7	1862,8	2,71
$0,1 \cdot t$	0,8	1702,0	1639,7	3,66
$0,15 \cdot t$	0,7	1489,2	1438,4	3,41
$0,2 \cdot t$	0,6	1276,5	1232,6	3,44

Таблица 2. – Сравнение значений N_{Rd} армокаменного элемента А2 с поперечным армированием сетками в горизонтальных растворных швах по СП 5.02.01-2021 и по методике, учитывающей физическую нелинейность

e_0	Φ	f_{dr} (МПа)	$N_{Rd,1}$ (кН)	$N_{Rd,2}$ (кН)	$\left \frac{N_{Rd,1} - N_{Rd,2}}{N_{Rd,1}} \right \cdot 100\%$
0	1	5,32	1384,4	1395,1	0,8
$0,05 \cdot t$	0,9	5,07	1186,4	1153,4	2,8
$0,1 \cdot t$	0,8	4,81	1001,6	983	1,9
$0,15 \cdot t$	0,7	4,56	830,1	812,7	2,1
$0,2 \cdot t$	0,6	4,30	671,8	658,1	2,0

Таблица 3. – Сравнение значений N_{Rd} армокаменного элемента А3 с продольным армированием по СП 5.02.01-2021 и по методике, учитывающей физическую нелинейность

Продольное армирование	A_s (мм ²)	z (мм)	$N_{Rd,1}$ (кН)	$N_{Rd,2}$ (кН)	$\left \frac{N_{Rd,1} - N_{Rd,2}}{N_{Rd,1}} \right \cdot 100\%$
2Ø 10 мм	157	567,0	33,3	32,5	2,40
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

Таблица 4. – Сравнение значений M_{Rd} армокаменного элемента АЗ с продольным армированием по СП 5.02.01-2021 и по методике, учитывающей физическую нелинейность

Продольное армирование	A_s (мм ²)	z (мм)	$M_{Rd,1}$ (кНм)	$M_{Rd,2}$ (кНм)	$\left \frac{M_{Rd,1} - M_{Rd,2}}{M_{Rd,1}} \right \cdot 100\%$
2Ø 10 мм	157	567,0	40,1	39,7	0,90
2Ø 12 мм	226	557,0	56,6	56,6	0,08
2Ø 14 мм	308	545,0	75,5	74,5	1,37
2Ø 16 мм	402	531,2	96,1	96,0	0,10
2Ø 18 мм	509	515,6	118,1	117,8	0,25

Заключение. Разница между значениями сопротивлений, определенными по зависимостям норм проектирования СП 5.02.01-2021 и по разработанной методике не превышает 5%. Таким образом, результаты численного исследования подтверждают возможность применения предложенных аппроксимаций диаграмм и методики расчета, учитывающей физическую нелинейность деформирования материалов, для вычисления расчетных значений сопротивления сжатию коротких каменных и армокаменных элементов в рамках проверок предельного состояния несущей способности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блохина Н.С. Проблема учета физической нелинейности при расчете строительных конструкций // Вестн. МГСУ. – 2011. – № 6. – С. 384–387.
2. Блохина Н.С. Расчет конструкций из анизотропных материалов с учетом физической нелинейности // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 1 (240). – С. 3–5.
3. Грановский А.В. Каменная кладка: хрупкий или пластичный материал? // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 3. – С. 22–28. DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.22-28.
4. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчёта: моногр. / Н.И. Карпенко, Б.С. Соколов, О.В. Радаикин. – М.: 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. Кабанцев О.В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния // Вестн. Томского гос. архитектурно-строит. ун-та. – 2015. – № 4 (51). – С. 113–134.
7. Лазовский Д.Н., Хаткевич А.М. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию армокаменных элементов // Вестн. МГСУ. – 2022. – Т. 17, № 12. – С. 1638–1652. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652.

REFERENCES

1. Blokhina, N.S. (2011). Problema ucheta fizicheskoi nelineinosti pri raschete stroitel'nykh konstruksii [The problem of physical nonlinearity accounting in the building structures calculation]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, (6), 384–387. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Blokhina, N.S. (2012). Raschet konstruksii iz anizotropnykh materialov s primeneniem fizicheskoi nelineinosti. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheni*, 1(240), 3–5. (In Russ.).
3. Granovskii, A.V. (2019). Kamennaya kladka: khrupkii ili plastichnyi material? *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*, (3), 22–28. (In Russ.). DOI: 10.33622/0869-7019.2019.03.22-28.
4. Karpenko, N.I., Sokolov, B.S. & Radaikin, O.V. (2019). *Proektirovanie betonnykh, zhelezobetonnykh, kamennykh i armokamennykh elementov i konstruksii s primeneniem diagrammykh metodov rascheta*. Moscow: ASV. (In Russ.).
5. Sokolov, B.S. & Antakov, A.B. (2019). Analiticheskaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennykh kladok pri szhatii na osnove avtorskoi teorii. *Stroitel'nye materialy*, (9), 51–55. (In Russ.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
6. Kabantsev, O.V. (2015). Diskretnaya model' kamennoi kladki v usloviyakh dvukhosnogo napryazhennogo sostoyaniya [Discrete model of masonry under biaxial stresses]. *Vestn. Tomskogo gos. arkhitekturno-stroit. un-ta [J. of Construction and Architecture]*, 4(51), 113–134. (In Russ., abstr. in Engl.).
7. Lazovskii, D.N. & Khatkevich, A.M. (2022). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu armokamennykh elementov [Deformation approach to the calculation of compression resistance of reinforced stone elements]. *Vestn. MGSU [Vestnik MGSU]*, 17(12), 1638–1652. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652.

Поступила 14.09.2023

**A DEFORMATION APPROACH TO CALCULATING THE CALCULATED VALUES
OF THE COMPRESSION RESISTANCE OF STONE AND REINFORCED STONE ELEMENTS
IN THE FRAMEWORK OF CHECKS OF THE LIMITING STATE OF THE BEARING CAPACITY**

A. KHATKEVICH¹⁾, D. LAZOUSKI²⁾, D. GLUKHOV³⁾, E. CHAPARANGANDA⁴⁾
*(<sup>1), ²⁾Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, ³⁾LLC «SoftClub», Minsk,
⁴⁾Botswana International University Of Science And Technology)</sup>*

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

On the example of short non-reinforced, reinforced stone elements with transverse and longitudinal reinforcement, taking into account the proposals for deformation diagrams, calculations of the calculated values of compression resistance were carried out. The calculated values are compared with similar values determined according to the current design standards. The results of the calculations and comparison confirmed the possibility of using the proposed approximations of diagrams and calculation methods that take into account the physical nonlinearity of deformation of materials to calculate the calculated values of compression resistance of short stone and reinforced stone elements.

Keywords: *physical nonlinearity, deformation diagram, calculation method, limit state, calculated value of compression resistance, deformation approach.*