

УДК 624.07

ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ВЫЧИСЛЕНИЮ РАСЧЕТНЫХ ЗНАЧЕНИЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ СЖАТИЮ КАМЕННЫХ И АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

А.М. Хаткевич

Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, Республика Беларусь
e-mail: a.khatkevich@psu.by

Приведены предложения по графоаналитическому 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 проведены вычисления расчетных значений сопротивления сжатию. Вычисленные значения сопоставлены с аналогичными значениями, определенными по нормам проектирования СП 5.02.01 «Каменные и армокаменные конструкции».

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

DEFORMATION APPROACH TO CALCULATE THE VALUES OF COMPRESSION RESISTANCE OF STONE AND REINFORCED STONE ELEMENTS

A. Khatkevich

Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, Republic of Belarus
e-mail: a.khatkevich@psu.by

The proposals for the graphoanalytic description of the calculated deformation diagrams of non-reinforced masonry and masonry with transverse reinforcement in horizontal mortar joints are presented. Calculations of the calculated values of compression resistance were carried out on the example of short non-reinforced, reinforced stone elements with transverse and longitudinal reinforcement. The calculated values are compared with similar values determined according to the design standards of SP 5.02.01 Stone and reinforced structures.

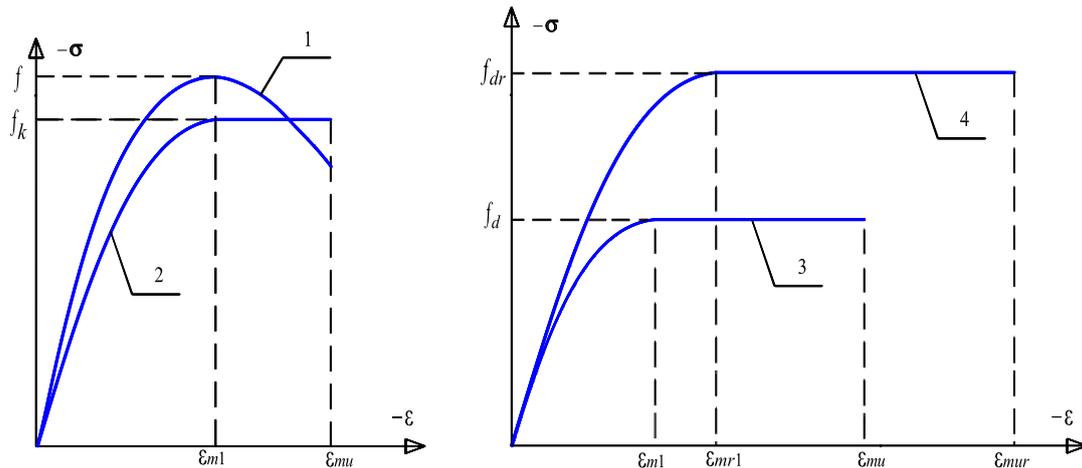
Keywords: physical nonlinearity, deformation diagram, calculation method, calculated value of compression resistance, deformation approach.

Введение. Физическая нелинейность является важнейшим свойством многих материалов строительных конструкций и, как следствие, ее учет при проектировании зданий и сооружений первостепенен с точки зрения приближения расчетных моделей к действительной работе конструкций и повышения точности проводимых расчетов.

Учету нелинейности конструкций из каменных кладок посвящены работы [1–5]. В них 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. Возможность применения *деформационного подхода* для расчета сжатых элементов, выполненных из неармированной каменной кладки, кладки с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах и продольной стальной арматуры рассматривалась также в [6], сравнение результатов расчета с экспериментальными данными показало хорошую сходимость. При этом работа [6] была посвящена расчету сопротивления сжатию по «фактическим» диаграммам. Проектирование должно сопровождаться проверками предельных состояний и выполняться

в соответствии с [7; 8]. В частности, проверка предельного состояния несущей способности каменных и армокаменных элементов выполняется сопоставлением расчетного значения продольного сжимающего усилия N_{Ed} с расчетным значением сопротивления сжатию N_{Rd} , для вычисления которого следует использовать расчетные диаграммы, позволяющие обеспечить безопасность проектных решений.

Диаграммы деформирования (состояния) кладки. Для неармированной каменной кладки СП 5.02.01 [8] регламентирует применение параболических и параболически-линейных диаграмм, рисунок 1.



- 1 – фактическая (параболическая) диаграмма [8]; 2 – характеристическая (параболически-линейная) диаграмма [8];
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

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} . Аналитическое описание расчетной диаграммы деформирования « $\sigma - \epsilon$ » неармированной каменной кладки в СП 5.02.01 отсутствует. При проведении расчетов предлагается использовать следующую зависимость:

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

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 не рассматривается. *Предлагается* диаграмму деформирования такой кладки принимать аналогичной формы с диаграммой неармированной кладки в виде параболически-линейного графика с ее аппроксимацией в виде:

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

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;

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

Значения ε_{mr1} и ε_{mur} предлагается определять:

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

Методика расчета [6] 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.

Отличием от общей методики [6] при вычислении расчетного значения сопротивления сжатию N_{Rd} также является *принятие другого критерия расчета* – достижение предельных значений относительных деформаций кладки ε_{mu} (ε_{mur}) и, или продольной арматуры ε_{sy} , 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.

Верификация методики выполнена сопоставлением вычисленных расчетных значений сопротивления сжатию $N_{Rd,1}$ по нормам СП 5.02.01 и по [6] с учетом применения предложенных аппроксимаций диаграмм $N_{Rd,2}$ на следующих характерных элементах:

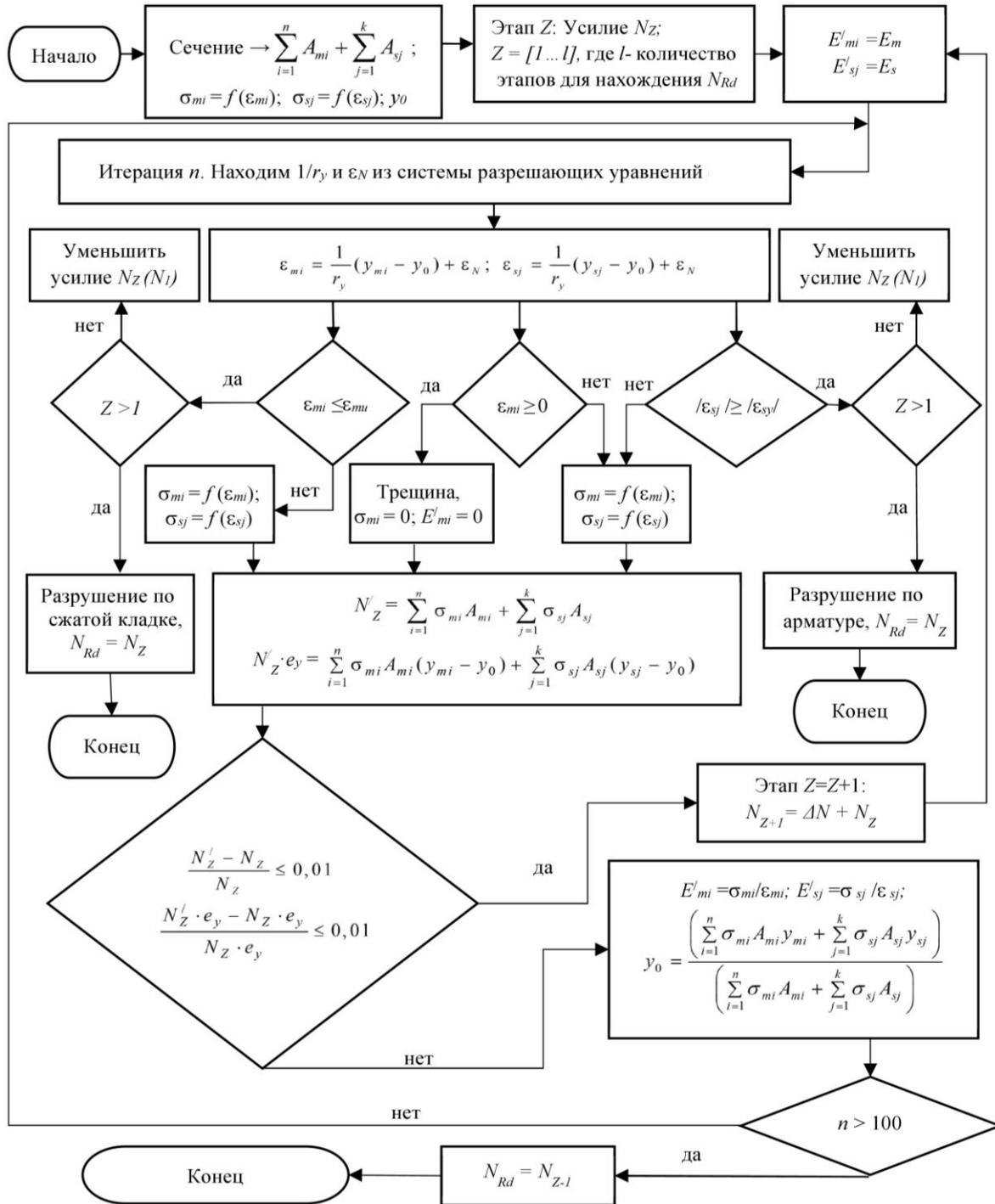
– A1: неармированный элемент в виде простенка (участка стены), поперечное сечение $b \times t = 4 \times 2$ кирпича (1030 × 510мм). Продольное усилие приложено с переменным эксцентриситетом (0; 0,05· t ; 0,1· t ; 0,15· t ; 0,2· t);

– A2: армокаменный элемент в виде столба (простенка) с армированием сетками в горизонтальных растворных швах, поперечное сечение $b \times t = 2 \times 2$ кирпича (510 × 510мм). Продольное усилие приложено с переменным эксцентриситетом (0; 0,05· t ; 0,1· t ; 0,15· t ; 0,2· t);

– A3 армокаменный элемент в виде столба (простенка) с продольным армированием, поперечное сечение $b \times t = 1,5 \times 2,5$ кирпича (380 × 640 мм). Эксцентриситет приложения продольного усилия $e_0 = 1,5$ м.

Каменная кладка всех элементов (A1-A3) 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 M10. 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 A2 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.

Продольное армирование элемента А3 размещается на расстоянии $c = 50$ мм от растянутой грани, рабочая высота сечения $d = t - c = 640 - 50 = 590$ мм. Продольное армирование рассматриваем в виде стержневой арматурой в количестве 2 шт. $\varnothing 10, 12, 14, 16, 18$ и 20 мм с расчетным значением прочности на растяжение $f_{yd} = 450$ МПа.



E_m, E_s – модуль упругости кладки и арматуры соответственно

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

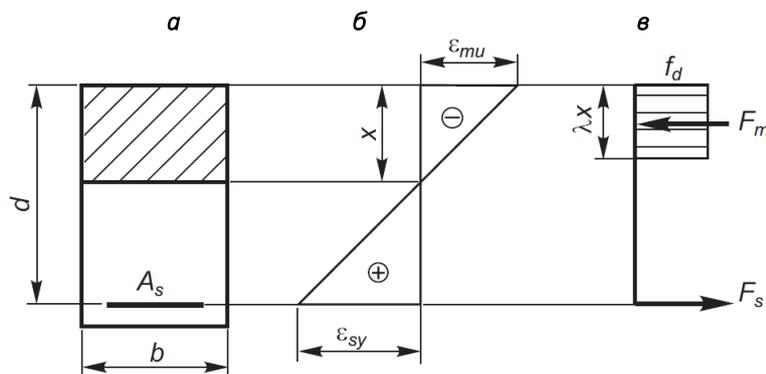
Верификация методики. Расчетное значение сопротивления сжатию сечения неармированного элемента А1 в соответствии с СП 5.02.01 вычислялось:

$$N_{rd,1} = \Phi \cdot b \cdot t \cdot f_d, \tag{4}$$

где Φ – коэффициент уменьшения сопротивления сжатию сечения, учитывающий эксцентриситет приложения нагрузки.

Расчетное значение сопротивления сжатию сечения армокаменного элемента А2 в соответствии с СП 5.02.01 вычисляется с заменой f_d на f_{dr} .

Схема деформаций и усилий в сечении короткого армокаменного элемента при изгибе (внецентренном сжатии) по СП 5.02.01 показана на рисунке 2.



а – 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 2. — Расчетная схема поперечного сечения изгибаемого (внецентренно сжатого) армокаменного элемента [8, стр. 58]

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

$$N_{Rd,1} = \frac{A_s \cdot f_{yd} \cdot z}{e_0 + h/2 - c - z'} \tag{6}$$

где z – плечо внутренних усилий в растянутой арматуре и сжатой зоне сечения.

Расчетные значения сопротивления сжатию сечений элементов $N_{Rd,2}$ по описанной методике расчета с учетом применения предложенных аппроксимаций диаграмм вычислены в программе «Beta_K». Результаты сравнения $N_{Rd,1}$ и $N_{Rd,2}$ показаны на рисунке 3.

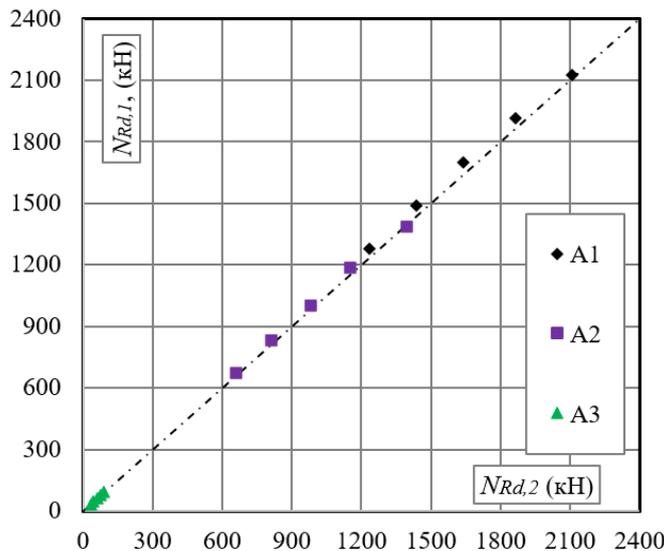


Рисунок 3. – Сравнение значений N_{Rd} характерных элементов А1-А3 по СП 5.02.01 и по методике, учитывающей физическую нелинейность

Заключение. Разница между значениями сопротивлений, определенными по зависимостям норм проектирования СП 5.02.01 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. Расчет конструкций из анизотропных материалов с учетом физической нелинейности / Н. С. Блохина // Строительная механика и расчет сооружений. – 2012. – № 1(240). – С. 3-5. – EDN OPQWDJ.
2. Грановский, А. В. Каменная кладка: хрупкий или пластичный материал? / А. В. Грановский // Промышленное и гражданское строительство. – 2019. – № 3. – С. 22-28. – DOI 10.33622/0869-7019.2019.03.22-28. – EDN ZAHMEN.
3. Карпенко, Н. И. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчёта : монография / Н. И. Карпенко, Б. С. Соколов, О. В. Радайкин. – М.: АСВ, 2019. – 194 с.
4. Соколов, Б. С. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории / Б. С. Соколов, А. Б. Антаков // Строительные материалы. – 2019. – № 9. – С. 51-55. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
5. Кабанцев, О. В. Дискретная модель каменной кладки в условиях двухосного напряженного состояния / О. В. Кабанцев // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2015. – № 4(51). – С. 113-134. – EDN UDKOPH.
6. 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.
7. СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. Взамен СН 2.01.01-2019 : введен 30.06.2022. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2022. – 60 с.
8. 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.