

УДК 624.012.15+624.012.25

## РАСЧЕТ СЖАТЫХ АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ ИХ МАТЕРИАЛОВ

**Д.Н. Лазовский, А.М. Хаткевич**

Полоцкий государственный университет, Республика Беларусь  
e-mail: d.lazovski@psu.by, a.khatkevich@psu.by

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

**Ключевые слова:** армокаменные элементы, физическая нелинейность, сжатие, напряженно-деформированное состояние, деформационная модель.

## CALCULATION OF COMPRESSION OF REINFORCED MASONRY ELEMENTS TAKING INTO ACCOUNT PHYSICAL NON-LINEARITY OF THEIR MATERIALS

**D. Lazovski, A. Khatkevich**

Polotsk state University, Republic of Belarus  
e-mail: d.lazovski@psu.by, 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. Method is based on the positions of the general deformed model; he makes it possible to calculate the cross-sections of 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:** reinforced masonry elements, physical nonlinearity, compression, stress-strain state, the deformation model.

**Введение.** Сжатые элементы в виде столбов, простенков, пилонов и других подобных конструкций широко применяются в зданиях и сооружениях различного назначения. С помощью армирования получают армокаменные элементы, обладающие хорошими технико-экономическими показателями и, в частности, высокой прочностью.

Различают армокаменные элементы с продольным армированием и армокаменные элементы с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах, в особых случаях находят применение армокаменные элементы со смешанным армированием – одновременно продольным и поперечным.

Анализ используемых методов расчета сжатых армокаменных элементов [1-4] показал, что им присущ ряд недостатков:

- рассматривается одна стадия работы сжатого элемента - предельная стадия по прочности;
- отсутствует инструментарий для учета физической нелинейности материалов армокаменных элементов;
- перераспределение усилий в поперечных сечениях элементов и учет неполного использования прочностных свойств материалов армокаменных элементов учитывается упрощенными эмпирическими методами. Так, например, прочность кладки в комплексных элементах с железобетоном уменьшается введением постоянного, не зависящего от объемного соотношения кладки и железобетона, коэффициента 0,85; во внецентренно сжатых армокаменных и комплексных элементах вводятся ограничения по количеству продольной арматуры, к прочностным характеристикам арматуры также вводятся коэффициенты условий работы.

Таким образом, известные методы расчета с вышеописанными упрощениями искажают истинное напряженно-деформированное состояние сечений сжатых армокаменных элементов в стадии разрушения и не позволяют описать напряженно-деформированное состояние на промежуточных стадиях нагружения. Это может негативно отражаться на надежности проектируемых возводимых либо усиливаемых существующих сжатых элементов.

Одним из направлений получения при проектировании более экономичных и надежных решений строительных конструкций является применение деформационных методов расчета [5, 6], учитывающих физическую нелинейность материалов в виде диаграмм деформирования.

**Основная часть.** Методика расчета сжатых армокаменных элементов с учетом физической нелинейности.

Согласно [1-4] каменная кладка рассматривается как однородный материал с осредненными физико-механическими характеристиками. Используя метод сечений, сопротивление сжатию, соответствующее прочности армокаменного элемента в предельной стадии, находится из уравнений равновесия внутренних и внешних усилий. Эюра напряжений в сжатой зоне (рисунок 1, а) заменяется на прямоугольную, высота сжатой зоны при этом сокращается (рисунок 1, б, в).

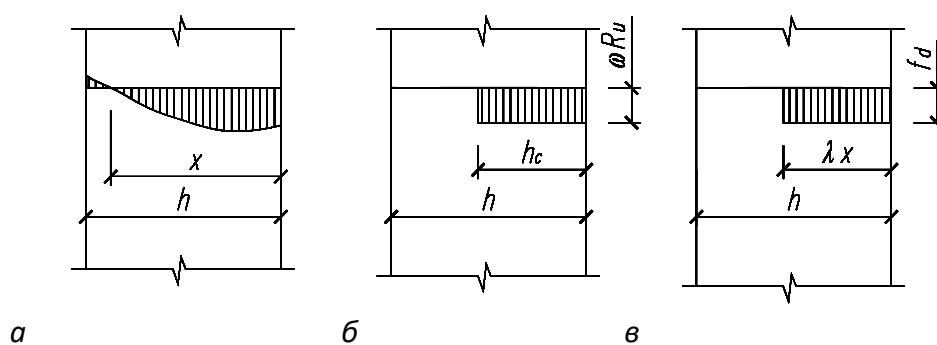
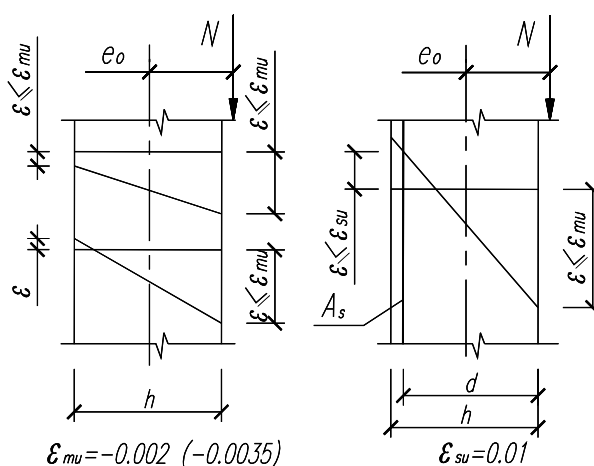


Рисунок 1. – Распределение нормальных напряжений в поперечном сечении: фактическое (а); по [11, 12] (б); по [13, 14] (в); по [15] (г)

На рисунке 1:  $x$  – высота сжатой зоны;  $h$  – высота сечения в плоскости эксцентриситета;  $h_c$  – высота сжатой зоны сечения [1; 2];  $\lambda x$  – высота сжатой зоны сечения [3, 4];  $R_u$  – предел прочности кладки;  $w$  – коэффициент, учитывающий величину эксцентриситета;  $f_d$  – прочность кладки при сжатии сжатую [3, 4].

Общими положениями расчета армокаменных элементов при действии сжимающих усилий в [3, 4] является:

- соблюдение гипотезы Бернулли (плоских сечений);
- вводятся ограничения на величину относительных деформаций соответственно материалу, из которого изготовлен армокаменный элемент, рисунок 2.



**Рисунок 2. – Распределение относительных деформаций в сечении сжатых элементов с учетом требований [3, 4]**

На рисунке 2:  $h$  – высота сечения в плоскости эксцентриситета;  $\varepsilon$  – относительная деформация;  $\varepsilon_{mu}$  – предельная относительная деформация для каменной кладки;  $\varepsilon_{su}$  – предельная относительная деформация для арматуры;  $A_s$  – продольная арматура;  $N$  – продольное усилие;  $e_0$  – эксцентриситет.

Указанные положения расчета соответствуют условиям применения общего деформационного метода, успешно используемого для расчета железобетонных элементов.

На основе метода сечений и общей деформационной модели была предложена методика расчета армокаменных элементов [7; 8], учитывающая:

- уравнения равновесия;
- условия распределения деформаций по сечению в виде гипотезы плоских сечений;
- диаграммы деформирования материалов, учитывающие физическую нелинейность их деформирования под нагрузкой.

Благодаря применению данной методики имеется возможность вычислять параметры напряженно-деформированного состояния в сечениях сжатых армокаменных элементов с продольным и поперечным армированием в горизонтальных растворных швах на любой стадии деформирования (нагружения), в т.ч. и в стадии разрушения.

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  $A_{sj}$  в пределах которых деформации считаются равномерно распределенными.

Алгоритм вычисления параметров напряженно-деформированного состояния в сечениях сжатых армокаменных элементов предусматривает итерационный процесс вычисления относительных деформаций ( $\varepsilon_{mi}$ ;  $\varepsilon_{sj}$ ) и напряжений ( $\sigma_{mi}$ ;  $\sigma_{sj}$ ) в элементарных площадках. При величине деформаций в элементарной площадке, расположенной в растянутой зоне, превышающей предельные значения в последующих расчетных циклах, ее жесткость принимается нулевой.

Алгоритм вычисления сопротивления сжатию в предельной стадии по прочности предусматривает пошаговый метод последовательных нагружений с итерационным процессом вычисления относительных деформаций и напряжений в элементарных площадках на каждом шаге.

За сопротивление сжатию в предельной стадии по прочности принимается максимально достигнутое усилие, при котором сходится процесс последовательных приближений и соблюдаются уравнения равновесия:

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

Таким образом критерием разрушения является достижение деформаций, соответствующих максимально достигнутому усилию. Благодаря вышеописанному:

- появляется возможность учета полного перераспределения усилий в сечении армокаменных элементов, состоящих из нескольких материалов с разными физико-механическими характеристиками;
- исключается строгое нормирование предельной сжимаемости  $\varepsilon_{mu}$  для каменной кладки;
- отсутствует необходимость введения эмпирических коэффициентов к прочностным характеристикам каменной кладки в комплексных и армокаменных элементах.

Методика расчета армокаменных элементов с учетом физической нелинейности их материалов реализована в программном комплексе «Beta» (разработка д.т.н. Д.Н. Лазовского и к.т.н. Д.О. Глухова), позволяющем:

- учитывать истинные деформационные свойства составляющих сечение материалов в виде диаграмм деформирования;
- выявлять выявить степень использования прочностных свойств арматуры, каменной кладки и проводить расчеты без введения эмпирических коэффициентов.

Для проверки методики была сформирована выборка из экспериментально испытанных каменных и армокаменных элементов. Сравнивая рассчитанные параметры напряженно-деформированного состояния сечений, включая сопротивление сжатию в предельной стадии по прочности, с экспериментальными, установлена их хорошая сходимость, что позволяет рекомендовать предложенную методику расчета.

**Заключение.** Предлагаемая методика расчета сжатых армокаменных элементов позволяет определять параметры напряженно-деформированного состояния сечений на любом этапе нагружения, учитывая при этом физическую нелинейность деформирования исходных материалов в виде каменной кладки, арматуры, бетона.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Каменные и армокаменные конструкции : СНиП II-22-81\* (с изм. №1 и №2 ВУ). – Введ. СССР 01.01.83. – М. : Стройиздат, 2015. – 46 с.
2. Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81) : утв. 15.08.1985. – М. : (ЦИТП) Госстроя СССР, 1989. – 149 с.
3. 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.
4. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные нормы проектирования: ТКП 45-5.03-308-2017 (33020). – Введ. 01.01.2018. – Минск.: Минстройархитектуры, 2017. – 112 с.
5. Ерышев, В. А. Численные методы расчета прочности железобетонных элементов по нелинейной деформационной модели с использованием диаграмм деформирования материалов / В. А. Ерышев // Вестн. НГИЭИ. – 2018. – № 6 (85). – С. 17–26.
6. Лазовский, Д. Н. Оценка вероятностных характеристик распределения эффектов от внешнего воздействия и функции предельного состояния в расчетах железобетонных элементов / Д. Н. Лазовский, Д. О. Глухов, Т. М. Глухова // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 6. – С. 35–40.
7. 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.
8. Лазовский, Д.Н. Расчет сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов с учетом физической нелинейности / Д.Н. Лазовский, А.М. Хаткевич // Вестник Полоцкого гос. ун-та. Сер. Ф. – 2017. – № 16. – С. 41-50.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

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

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Новополоцк  
Полоцкий государственный университет  
2020

Об издании – [1](#), [2](#)

1 – дополнительный экран – сведения об издании

УДК 72:624/628+69(082)

Редакционная коллегия:

Л. М. Парфенова (председатель),  
А. С. Катульская (отв. секретарь), Е. Д. Лазовский,  
Н. В. Давыденко, Р. М. Платонова

**АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС: ПРОБЛЕМЫ, ПЕРСПЕКТИВЫ, ИННОВАЦИИ**  
[Электронный ресурс] : электронный сборник статей II международной научной конференции, Новополоцк, 28–29 нояб. 2019 г. / Полоцкий государственный университет ; под ред. Л. М. Парфеновой. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 электрон. опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-701-3.

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. Проанализированы 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.*

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

**№ госрегистрации 3671815379.**

**ISBN 978-985-531-701-3**

@Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Архитектурно-строительный комплекс: Проблемы, перспективы, инновации» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

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

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК СТАТЕЙ  
II МЕЖДУНАРОДНОЙ НАУЧНОЙ КОНФЕРЕНЦИИ

(Новополоцк, 28–29 ноября 2019 г.)

Технический редактор *Т. А. Дарьянова*.  
Компьютерная верстка *Т. А. Дарьяновой*.  
Компьютерный дизайн обложки *Е. А. Балабуевой*.

---

Подписано к использованию 09.09.2020.  
Объем издания: 21,05 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 420.

---

Издатель и полиграфическое исполнение:  
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации  
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий  
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,  
г. Новополоцк,  
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44  
<http://www.psu.by>