

УДК 624.012.15

**ВЕРИФИКАЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО МЕТОДА РАСЧЕТА  
СЖАТЫХ АРМОКАМЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С УЧЕТОМ СП 5.02.01-2021  
«КАМЕННЫЕ И АРМОКАМЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ»**

**Я. Н. МАЦКЕВИЧ, А. С. СТУК**  
(Представлено: А. М. ХАТКЕВИЧ)

*Рассматривается возможность применения деформационного метода расчета сжатых армокаменных элементов с учетом общих положений расчета, содержащихся в нормах проектирования СП 5.02.01-2021 «Каменные и армокаменные конструкции». На сформированной выборке данных получена хорошая сходимость экспериментальных и теоретических значений.*

**Введение.** Деформационный метод расчета железобетонных элементов нашел широкое применение в проектировании и реализован в программном комплексе «Beta» (разработка д.т.н. Д.Н. Лазовского и к.т.н. Д.О. Глухова). Деформационный метод расчета сжатых армокаменных элементов, включающий алгоритмы вычисления параметров их напряженно-деформированного состояния на всех уровнях нагружения [1, 2, 3], позволяет выполнять расчеты армокаменных элементов в соответствии с СП 5.02.01 «Каменные и армокаменные конструкции» [4]. В то же время оценка возможности применения методики требует ее верификации на выборке экспериментальных данных.

**Верификация метода расчета.** Проверка методики выполнялась сопоставлением теоретических (полученных в программном комплексе «Beta») и экспериментальных значений сопротивления сжатию армокаменных элементов. Сопоставление проводилось с учетом процедур и статических методов обработки результатов испытаний приложения D к ТКП EN 1990 [5].

При сравнении экспериментальных и теоретических значений фактически измеренные параметры подставляются в функцию сопротивления для определения теоретического значения  $N_{u,t}$ , которое затем сравнивается с экспериментальными значениями  $N_{u,exp}$ . Пары соответствующих значений ( $N_{u,t}$ ,  $N_{u,exp}$ ) наносятся на диаграмму. Если функция сопротивления является полной и точной, то положение всех точек выпадает на прямую, лежащую под углом  $\pi/4$ .

Для каждого экспериментального значения  $N_{u,exp}$  определялась ошибка  $\delta_i$

$$\delta_i = \frac{N_{u,exp}}{b \cdot N_{u,t}} \quad (1)$$

где  $b$  – наилучшее приближение, определяемое методом «наименьших квадратов» и задаваемое выражением

$$b = \frac{\sum N_{u,exp} \cdot N_{u,t}}{\sum N_{u,t}^2} \quad (2)$$

На основе всех полученных значений  $\delta_i$ , вычислялось оценочное значение коэффициента вариации ошибок  $V_\delta$  с учетом того, что

$$\Delta_i = \ln(\delta_i) \quad (3)$$

Оценочное значение  $\bar{\Delta}$  для  $E(\Delta)$

$$\bar{\Delta} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta_i \quad (4)$$

Оценочное значение  $s_\Delta^2$  для  $\sigma_\Delta^2$ :

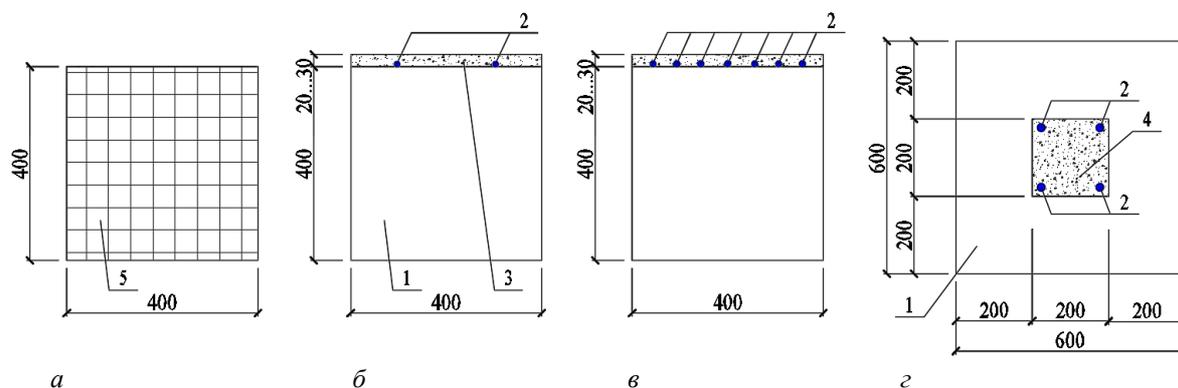
$$s_\Delta^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta_i - \bar{\Delta})^2 \quad (5)$$

Коэффициент вариации  $V_\delta$  для вектора ошибок  $\delta$  определялся по формуле

$$V_\delta = \sqrt{\exp(s_\Delta^2) - 1} \quad (6)$$

В выборку экспериментальных исследований нами были включены данные по испытаниям коротких неармированных элементов и армокаменных элементов с продольным и поперечным армированием в горизонтальных растворных швах в виде сеток, полученные А. Г. Фигаровым [6] на опытных образцах из кладочных изделий из природного пиленого камня.

Схемы армирования опытных образцов в исследованиях А. Г. Фигарова приведены на рис. 1, характеристика армирования образцов – в таблицах 1, 2.



1 – неармированная каменная кладка; 2 – продольная стальная арматура;  
3 – защитный штукатурный слой (раствор); 4 – мелкозернистый бетон;  
5 – кладка с поперечным армированием в горизонтальных растворных швах;  
а – серия Ф1–Ф3; б – серия Ф4; в – серия Ф5; г – серия Ф6 и Ф7

Рисунок 1. – Схема армирования образцов серий Ф1–Ф7, опыты А. Г. Фигарова [6]

Таблица 1. – Характеристика опытных образцов серий Ф0–Ф3

Серия	Размеры образцов (м)	Поперечное армирование	
		Процент армирования (%)	Размер ячеек $a \times b$ (см)
Ф0	0,4×0,4×1,2	–	–
Ф1	0,4×0,4×1,2	0,270	12×12
Ф2	0,4×0,4×1,2	0,656	5×5
Ф3	0,4×0,4×1,2	1,090	3×3

Таблица 2. – Характеристика опытных образцов серий Ф4–Ф7

Серия	Группа образцов	Размеры сечения (мм)	Армирование		Эксцентриситет $e_0$
			сжатой зоны	растянутой (менее сжатой) зоны	
Ф4	Ф4.1	400×400	–	2 Ø 11	$h/6$
	Ф4.2		–	2 Ø 11	$h/2$
	Ф4.3		–	2 Ø 11	$h$
Ф5	Ф5.1	400×400	–	7 Ø 12	$h/6$
	Ф5.2		–	7 Ø 12	$h/2$
	Ф5.3		–	7 Ø 12	$h$
Ф6	–	600×600	–	4 Ø 16	0
Ф7	–	600×600	–	4 Ø 25	0

Данные экспериментальных  $N_{и,exp}$  и теоретических  $N_{и,t}$ , полученных в программном комплексе «Beta», значений сопротивления сжатию приведены в таблице 3.

Таблица 3. – Выборка результатов экспериментальных исследований, проведенных А.Г. Фигаровым [6]

Серия	Номер образца	Фактические размеры $b \times h \times l$ (мм)	$e_0$ (мм)	$N_{и,exp}$ (кН)	$N_{и,t}$ (кН)
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
Ф1	Ф1.1	400×400×1200	0	746	769
	Ф1.2	400×400×1200	0	735	769
	Ф1.3	400×400×1200	0	708	769
Ф2	Ф2.1	400×400×1200	0	667	712
	Ф2.2	400×400×1200	0	764	712
	Ф2.3	400×400×1200	0	766	712

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
Ф3	Ф3.1	400×400×12700	0	763	811
	Ф3.2	400×400×1270	0	827	811
	Ф3.3	400×400×1270	0	717	811
Ф4	Ф4.1.1	400×420×1230	67	471	505
	Ф4.1.2	400×420×1230	67	589	505
	Ф4.1.3	400×420×1230	67	510	505
	Ф4.2.1	400×420×1230	200	235	278
	Ф4.2.2	400×420×1230	200	226	278
	Ф4.2.3	400×420×1230	200	256	278
	Ф4.3.1	400×420×1230	400	135	127
	Ф4.3.2	400×420×1230	400	129	127
	Ф4.3.3	400×420×1230	400	107	127
Ф5	Ф5.1.1	400×430×1230	67	500	448
	Ф5.1.2	400×430×1230	67	491	448
	Ф5.1.3	400×430×1230	67	471	448
	Ф5.2.1	400×430×1230	200	334	284
	Ф5.2.2	400×430×1230	200	353	284
	Ф5.2.3	400×430×1230	200	324	284
	Ф5.3.1	400×430×1230	400	205	183
	Ф5.3.2	400×430×1230	400	222	183
	Ф5.3.3	400×430×1230	400	192	183
Ф6	Ф6.1	600×600×1650	0	1466	1633
	Ф6.2	600×600×1650	0	1610	1633
	Ф6.3	600×600×1650	0	1713	1633
Ф7	Ф7.1	600×600×1650	0	1593	1694
	Ф7.2	600×600×1650	0	1469	1694
	Ф7.3	600×600×1650	0	1586	1694

Диаграмма сравнения экспериментальных и теоретических значений сопротивления сжатию армокаменных образцов с учетом методики приложения Д к ТКП EN 1990 [5] показана на рис. 2.

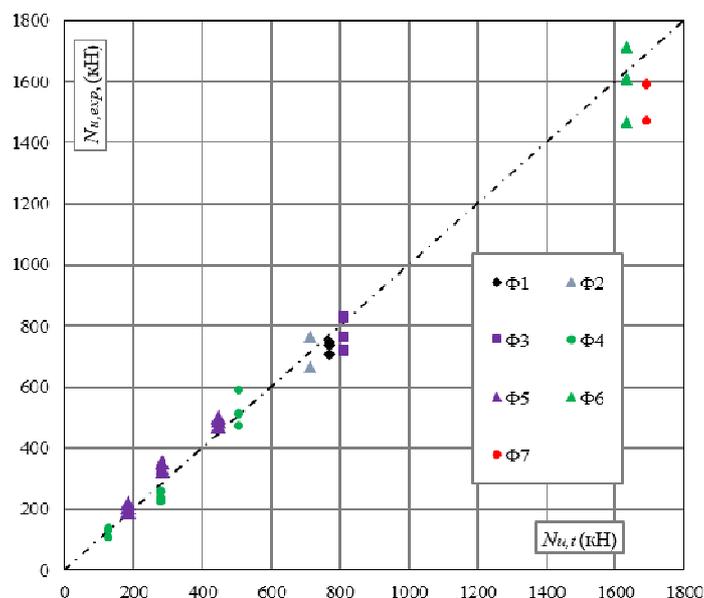


Рисунок 2. – Диаграмма  $N_{u,exp}-N_{u,t}$  для выборки образцов (по испытаниям А. Г. Фигарова)

**Заключение.** Методика расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов, реализованная в программном комплексе «Beta», позволяет рассчитывать элементы любой формы поперечного сечения без применения эмпирических правил и коэффициентов. Установлена хорошая сходимость эксперимен-

тальных и теоретических значений сопротивления сжатию армокаменных элементов – величина  $V_s = 0,11$  при  $\delta = 0,96$ . Полученные результаты свидетельствуют о возможности применения деформационного метода расчета сопротивления сжатию армокаменных элементов, показывающего высокую сходимость теоретически рассчитанных параметров с экспериментальными и соответственно позволяющего учесть общие положения расчета СП 5.02.01-2021 «Каменные и армокаменные конструкции».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хаткевич, А. М. Метод расчета прочности нормальных к продольной оси сечений конструкций из каменной кладки с учетом диаграмм деформирования / А. М. Хаткевич // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. – 2014. – № 8. – С. 45–53.
2. 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.
3. 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.
4. Каменные и армокаменные конструкции. Строительные правила Республики Беларусь. СП 5.02.01-2021. – Введ. 01.04.2021. – Минск.: Минстройархитектуры, 2021. – 123 с.
5. Еврокод. Основы проектирования строительных конструкций = Еўракод. Асновы праектавання будаўнічых канструкцый : ТКП EN 1990-2011\* (02250). – Введ. 01.04.15. – Минск : М-во архітэктуры і стр-ва Респ. Беларусь, 2015. – VIII, 86 с.
6. Фигаров, А. Г. Прочность и упругие свойства неармированной и армированной кладки из пиленого известнякового камня Ашперонского полуострова / А. Г. Фигаров // Исследования по каменным конструкциям : сб. ст. / Акад. стр-ва и архитектуры СССР, Центр. науч.-исслед. ин-т строит. конструкций «ЦНИИСК» ; под ред. Л. И. Онищика. – М., 1957. – С. 248–268.