

УДК 624.07

DOI 10.52928/2070-1683-2023-35-3-21-27

**ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ  
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СЖАТЫХ ЭЛЕМЕНТОВ  
ИЗ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ, УСИЛЕННЫХ ПОД НАГРУЗКОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ОБОЙМОЙ**

канд. техн. наук А.М. ХАТКЕВИЧ<sup>1)</sup>, д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ<sup>2)</sup>,  
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup> <sup>2)</sup> Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой, <sup>3)</sup> ООО «СофтКлуб», Минск)  
<sup>1)</sup> a.khatkevich@psu.by, <sup>2)</sup> d.lazovski@psu.by, <sup>3)</sup> d.gluhov@psu.by

*Статья посвящена моделированию напряженно-деформированного состояния сечений коротких элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой. Особенностью моделирования является возможность учета физической нелинейности деформирования кирпичной кладки, бетона и продольной арматуры обоймы, а также напряженного состояния до начала усиления. Приведены предложения по последовательности расчета элементов, подвергающихся усилению, разрешающие уравнения общего деформационного метода. На примере короткого элемента выполнено численное исследование. В рамках проверок предельного состояния несущей способности сопоставлены значения сопротивления сжатию в предельной по прочности стадии по действующим нормам проектирования и по предложенной методике. Результаты расчетов подтвердили возможность применения деформационной модели для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния коротких элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой.*

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

**Введение.** Реконструкция зданий и сооружений, связанная с увеличением нагрузок либо с восстановлением получивших в процессе эксплуатации повреждения несущих конструкций, зачастую сопровождается необходимостью их усиления. Усиление сжатых конструкций из кирпичной кладки, в частности столбов или простенков, для обеспечения выполнения условий предельного состояния несущей способности, эксплуатационной пригодности и живучести, как правило, производится изменением параметров их поперечных сечений. Возможны варианты увеличения поперечного сечения путем дополнительной кирпичной кладки либо путем устройства различного типа обойм.

При повышении сопротивления сжатию за счет дополнительной кладки сложным вопросом остается обеспечение совместной работы с существующим сечением, поскольку основной фактор, обеспечивающий совместную работу конструкции, – перевязка – не может быть выполнена. К тому же такой вариант зачастую неприменим ввиду снижения эксплуатационных характеристик здания, поскольку происходит значительное уменьшение полезной площади и размеров оконных и/или дверных проемов и т.п. В связи с вышесказанным наиболее целесообразным вариантом усиления является включение кладки в обойму, которая в свою очередь может быть трех видов: стальная, железобетонная и армированная растворная.

Усиление обоймой к тому же является весьма эффективным методом еще и за счет работы кирпичной кладки в условиях всестороннего сжатия, что увеличивает сопротивляемость воздействию продольных сил. Наиболее высокую степень увеличения сопротивления сжатию каменной кладки достигают применением стальных и железобетонных обойм. Совместная работа последней с кирпичной кладкой обеспечивается устройством борозд и/или расчисткой швов кладки; бетонирование производят методом инъектирования, нагнетая смесь через инъекционные отверстия в опалубке, торкретированием или последовательным бетонированием с наращиванием опалубки. Расчет усиливаемых конструкций выполняют в соответствии с основными требованиями, установленными в СН 2.01.01<sup>1)</sup>, согласно которому проверки предельного состояния несущей способности STR следует выполнять исходя из условия

$$E_d \leq R_d, \quad (1)$$

где  $E_d$  – расчетное значение эффектов воздействий (внутреннее усилие, вызванное расчетным воздействием нагрузок на конструкцию);

$R_d$  – расчетное значение сопротивления, для сжатых элементов  $R_d = N_{Rd}$ .

<sup>1)</sup> СН 2.01.01-2022. Основы проектирования строительных конструкций. Взамен СН 2.01.01-2019. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 60 с.

Определение расчетных значений сопротивления сжатию элементов из кирпичной кладки по СП 1.04.03-2022<sup>2</sup> выполняется по методу сечений без учета деформационных характеристик материалов, составляющих поперечное сечение простенка или столба, усиленного железобетонной обоймой. Как отмечалось в [1–4], учет физической нелинейности при проектировании является важным направлением в области приближения расчетных моделей к действительной работе конструкций и, соответственно, повышения точности проводимых расчетов.

Применение деформационного подхода к вычислению расчетных значений сопротивления сжатию  $N_{Rd}$  для выполнения проверок предельного состояния несущей способности элементов из кирпичной кладки, усиленных железобетонной обоймой, является целью данной работы.

**Исследования каменных элементов в обойме.** Метод усиления кладки обоймами известен относительно давно, и соответствующие исследования по выявлению эффективности различного рода обойм и основных факторов, влияющих на сопротивление сжатию, выполнялись еще в первой половине прошлого века В.А. Камейко, Р.Н. Квитницким, М.Я. Пильдишем и др. [5].

Представленная в их работах формула по вычислению сопротивления сжатию столбов или простенков в железобетонной обойме практически без существенных изменений вошла в ряд ТНПА<sup>3 4</sup>. В последние годы проводились исследования, связанные с напряженно-деформированным состоянием сжатых элементов в обоймах при местном сжатии, исследования по возможности и эффективности использования вместо обычного тяжелого бетона сталефибробетона и легких бетонов для устройства обойм [6–11].

Актуальные белорусские нормы СП 1.04.03-2022 проверку предельного состояния несущей способности столба или простенка из кирпичной каменной кладки, усиливаемого обоймой, при эксцентриситете продольного усилия, не выходящем за пределы ядра поперечного сечения, рекомендуют выполнять из условия, согласно которому расчетное значение продольного усилия  $N_{Ed}$  в произвольном сечении столба или простенка не должно превышать расчетного значения сопротивления сжатию этого сечения  $N_{Rd}$ . Значение сопротивления сжатию поперечного сечения столба или простенка из кирпичной кладки, усиленного железобетонной обоймой:

$$N_{Rd} = \psi \varphi \left[ \left( m_k f_d + \eta \cdot \frac{3\mu_{ad}}{1 + \mu_{ad}} \cdot \frac{f_{ywd,ad}}{100} \right) \cdot A + A_{s2,ad} f_{yd,ad} + \gamma_{c,ad} f_{cd,ad} A_{c,ad} \right], \quad (2)$$

где  $\psi$  – коэффициент уменьшения сопротивления сжатию элемента, усиленного обоймой, учитывающий влияние эксцентриситета приложения продольной силы относительно центра тяжести сечения каменной кладки  $e$ ;

$\varphi$  – коэффициент продольного изгиба усиливаемого столба или простенка;

$m_k$  – коэффициент, учитывающий наличие трещин в каменной кладке. Принимается равным: 1,0 – для кладки без повреждений; 0,7 – для кладки с трещинами;

$f_d$  – расчетное значение прочности на сжатие каменной кладки, МПа;

$\eta$  – коэффициент уменьшения прочности на растяжение хомутов обоймы, учитывающий влияние эксцентриситета  $e_0$  приложения сжимающей нагрузки;

$\mu_{ad}$  – процент поперечного армирования;

$A_{s2,ad}$  – площадь сечения продольной арматуры, мм<sup>2</sup>;

$\gamma_{c,ad}$  – коэффициент условий работы бетона обоймы. Принимается равным: 1 – при передаче нагрузки на обойму и наличии опоры обоймы снизу; 0,7 – при передаче нагрузки на обойму и отсутствии опоры внизу обоймы; 0,35 – без непосредственной передачи нагрузки на обойму;

$f_{cd,ad}$  – расчетное значение прочности на сжатие бетона обоймы;

$A_{c,ad}$  – площадь поперечного сечения бетона обоймы, заключенного между хомутами и кладкой (до защитного слоя), мм<sup>2</sup>.

Следует отметить отсутствие строгих указаний к (2) с отражением граничных значений процента армирования и наличие в нормах расчетных характеристик лишь для арматурной стали S240.

Также общие требования расчета усиливаемых конструкций регламентируют следующее положение – «при расчете конструкций, усиление которых выполняют под нагрузкой, учитывают напряжения, существующие в сохраняемых конструкциях в момент усиления». В то же время формула (2) не позволяет реализовать данное положение, а выполнить усиление простенка или столба с полной разгрузкой на практике невозможно.

**Моделирование напряженно-деформированного состояния (НДС) усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой сжатых элементов из кирпичной кладки.** Вычисление сопротивления сжатию и параметров НДС на любом этапе деформирования простенка или столба из каменной кладки, усиленного путем увеличения поперечного сечения железобетонной обоймой, производят методом сечений на основе общей деформационной модели [4].

<sup>2</sup> СП 1.04.03-2022. Обследование и усиление каменных и армокаменных конструкций. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2022. – 78 с.

<sup>3</sup> См. сноску 2.

<sup>4</sup> Пособие по проектированию каменных и армокаменных конструкций (к СНиП II-22-81): утв. Госстроем СССР 15.08.85 / Центр. науч.-исслед. ин-т стрит. конструкций. – М.: Центр. ин-т типового проектирования, 1987. – 150 с.

Расчет простенка или столба из каменной кладки, усиленного железобетонной облоймой, следует выполнять в следующей последовательности:

- первый этап заключается в определении параметров НДС усиливаемой конструкции на воздействия в момент выполнения усиления;
- второй этап предполагает учет технологических факторов во время выполнения усиления, главным из которых является усадка бетона облоймы;
- третий этап предполагает расчет параметров НДС и сопротивления сжатию после выполнения усиления, набора прочности бетона, приложения дополнительной нагрузки и т.д.

В связи с относительно небольшим влиянием на НДС усадки бетона усиления целесообразно расчет выполнять в два этапа.

Поперечное сечение каменного элемента рассматривается в виде совокупности  $k$  элементарных площадок (слоев) с площадью  $i$ -й площадки (слоя)  $A_{mi}$ . В пределах элементарных площадок (слоев) нормальные напряжения  $\sigma$  считаются равномерно распределенными, равными среднему значению напряжений на границах площадок (слоев). Продольное усилие  $N_1$  действует на расстоянии  $e_y$  и  $e_x$  от центра тяжести сечения. Распределение относительных деформаций  $\varepsilon_z$  по поперечному сечению принимается линейным, тогда разрешающие уравнения для общего случая косоугольного сжатия на первом этапе принимают вид:

$$\varepsilon_{N1} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \frac{1}{r_{x1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{y1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) - N_1 = 0; \quad (3)$$

$$\varepsilon_{N1} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{x1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \frac{1}{r_{y1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) (y_{mi} - y_0) - N_1 e_x = 0; \quad (4)$$

$$\varepsilon_{N1} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \frac{1}{r_{x1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{y1}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 - N_1 e_y = 0, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{N1}$  – продольные относительные деформации на уровне центра тяжести сечения от действия продольного усилия  $N_1$ ;

$E'_{mi}$  – текущее значение секущего модуля для элементарных площадок поперечного сечения усиливаемой конструкции;

$\varepsilon_{mi}$  – относительные деформации в  $i$ -й элементарной площадке;

$1/r_{y1}, 1/r_{x1}$  – кривизна в плоскости оси  $y$  и  $x$  соответственно от действия усилия  $N_1$ ;

$y_{mi}, x_{mi}$  – координаты центра тяжести  $i$ -й элементарной площадки (слоя);

$y_0, x_0$  – координаты центра тяжести расчетного поперечного сечения.

На втором этапе разрешающие уравнения при действии дополнительного продольного усилия  $N_{z,ad}$ :

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{N2} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} + \varepsilon_{N,ad} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} \right) + \\ & + \frac{1}{r_{x2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \frac{1}{r_{x,ad}} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_{y2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \frac{1}{r_{y,ad}} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (y_{sj} - y_0) \right) - N_2 = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \varepsilon_{N2} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) + \varepsilon_{N,ad} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) \right) + \\ & + \frac{1}{r_{x2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0)^2 + \frac{1}{r_{x,ad}} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0)^2 \right) + \\ & + \frac{1}{r_{y2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (x_{mi} - x_0) (y_{mi} - y_0) + \\ & + \frac{1}{r_{y,ad}} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (x_{mi} - x_0) (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) (y_{mi} - y_0) \right) - N_2 e_x = 0; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
 & \varepsilon_{N2} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) + \varepsilon_{N,ad} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn} (y_{mi} - y_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj} (y_{sj} - y_0) \right) + \\
 & + \frac{1}{r_{x2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0) (x_{mi} - x_0) + \\
 & + \frac{1}{r_{x,ad}} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn} (y_{mi} - y_0) (x_{mi} - x_0) + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (x_{sj} - x_0) (y_{sj} - y_0) \right) + \\
 & + \frac{1}{r_{y2}} \sum_{i=1}^k E'_{mi} A_{mi} (y_{mi} - y_0)^2 + \frac{1}{r_{y,ad}} \left( \sum_{i=1}^k E'_{cn,ad} A_{cn,ad} (y_{mi} - y_0)^2 + \sum_{j=1}^n E'_{sj,ad} A_{sj,ad} (y_{sj} - y_0)^2 \right) - N_2 e_y = 0.
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

где  $\varepsilon_{N2}$  – продольные относительные деформации на уровне центра тяжести сечения, представляющие собой сумму деформаций  $\varepsilon_{N1}$  и  $\varepsilon_{N,ad}$  от дополнительного продольного усилия  $N_{z,ad}$ ;

- $1/r_{y2}, 1/r_{x2}$  – кривизна в плоскости оси  $y$  и  $x$  соответственно от действия продольного усилия  $N_2$ ;
- $1/r_{y,ad}, 1/r_{x,ad}$  – кривизна в плоскости оси  $y$  и  $x$  соответственно от действия продольного усилия  $N_{z,ad}$ ;
- $N_2$  – продольное усилие на втором этапе, равно сумме усилий  $N_1$  и  $N_{z,ad}$ ;
- $E'_{cn,ad}$  – текущее значение секущего модуля для элементарных площадок бетона обоймы усиления;
- $E'_{sj,ad}$  – текущее значение секущего модуля арматуры обоймы усиления;
- $A_{cn,ad}$  – площадь элементарных площадок бетона обоймы усиления;
- $A_{sj,ad}$  – площадь  $j$ -го стержня продольной арматуры обоймы усиления.

При этом на втором этапе следует учесть изменение диаграммы деформирования кирпичной кладки ввиду ее работы в условиях всестороннего сжатия.

Для численного исследования используем следующие материалы:

- кирпичная кладка из керамических изделий 1-й группы ( $\varepsilon_{mu} = -3,5 \text{ ‰}$ ;  $\varepsilon_{m1} = -2,0 \text{ ‰}$ ) с приведенной прочностью при сжатии  $f_b = 30 \text{ МПа}$  на стандартном кладочном растворе заданного качества М10. Класс контроля выполнения работ – I,  $\gamma_M = 1,7$ . Характеристическая прочность кладки с учетом наличия продольного шва  $f_k = 0,8 \times 8,6 = 6,88 \text{ МПа}$ . Расчетная прочность кладки  $f_d = f_k / \gamma_M = 6,88 / 1,7 = 4,05 \text{ МПа}$ . Дефекты и повреждения (трещины) в кладке отсутствуют  $m_k = 1$ .

- продольное и поперечное армирование железобетонной обоймы принимаем в виде стержневой арматуры класса S 240. Считаем, что нагрузка передается с двух сторон (сверху и снизу обоймы), тогда для продольной арматуры  $f_{yd,ad} = 190 \text{ МПа}$ , поперечной  $f_{ywd,ad} = 150 \text{ МПа}$ ;

- бетон обоймы С16/20 мелкозернистый классов подвижности ПЗ-П4 с  $f_{cd,ad} = 10,67 \text{ МПа}$  и  $E = 0,85 \times 28 = 23,8 \text{ ГПа}$  ( $\varepsilon_{cu2} = -3,5 \text{ ‰}$ ;  $\varepsilon_{c2} = -2,0 \text{ ‰}$ ).

Вычисления выполняем для короткого элемента в виде столба (простенка) поперечным сечением  $b \times h = 2 \times 2$  кирпича ( $510 \times 510 \text{ мм}$ ). Железобетонная обойма выполняется толщиной 80 мм с защитным слоем 40 мм. Пример напряженно-деформированного состояния рассматриваемого элемента в предельной стадии по прочности показан на рисунках 1, 2.

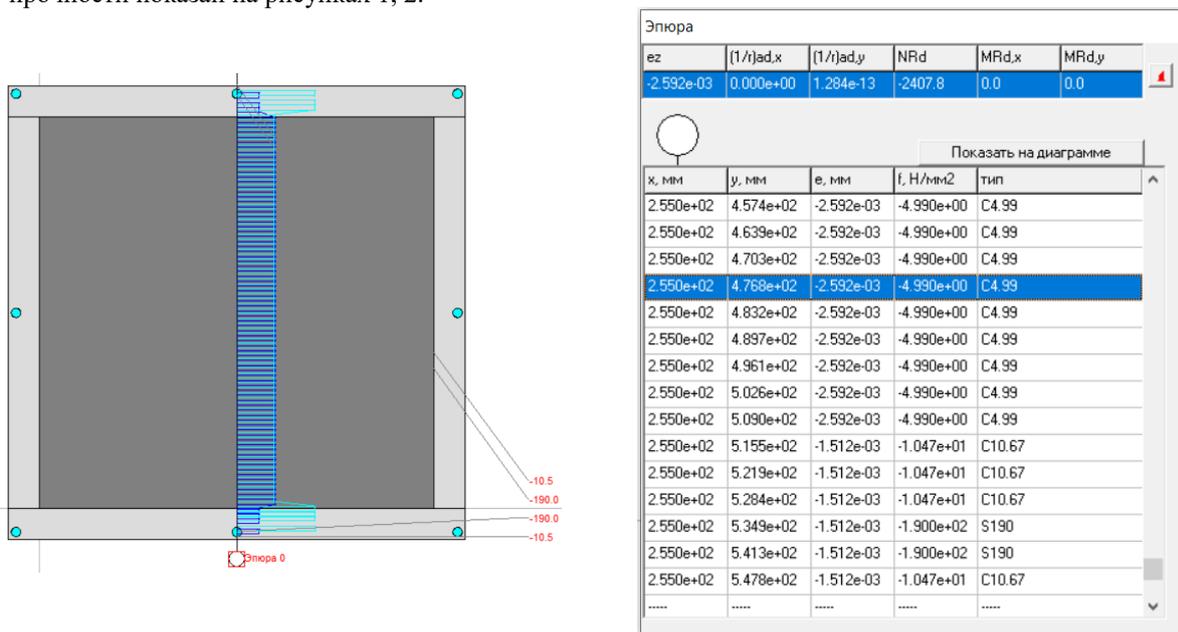
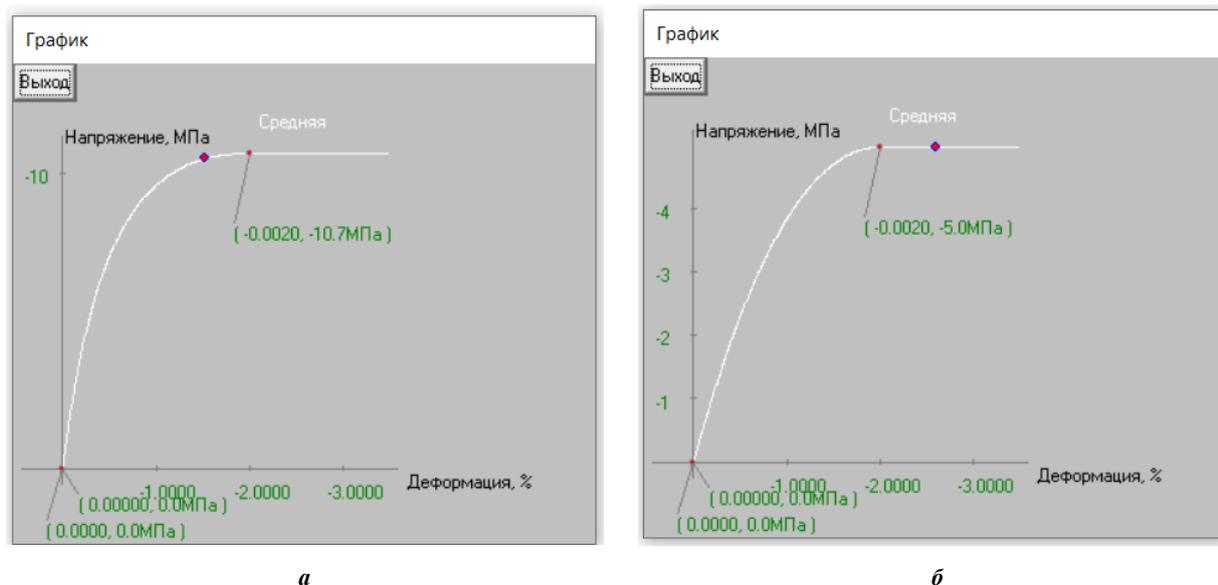


Рисунок 1. – Напряженно-деформированное состояние поперечного сечения из каменной кладки, усиленного железобетонной обоймой



*a* – диаграмма бетона усиления; *б* – диаграмма кирпичной кладки

Рисунок 2. – Расчетные диаграммы деформирования

Анализируя НДС рассматриваемого сечения, можно заметить, что в предельной стадии прочность кирпичной кладки реализована полностью (напряжения 4,99 МПа, переход на горизонтальный участок диаграммы), напряжения в бетоне 10,47 МПа.

Расчетные значения сопротивления сжатию сечений элементов  $N_{Rd,2}$  по описанной методике расчета вычислены в программе «Beta\_K». Расчетные значения  $N_{Rd,1}$  вычислены по (2). Результаты сравнения  $N_{Rd,1}$  и  $N_{Rd,2}$  показаны на рисунке 3.

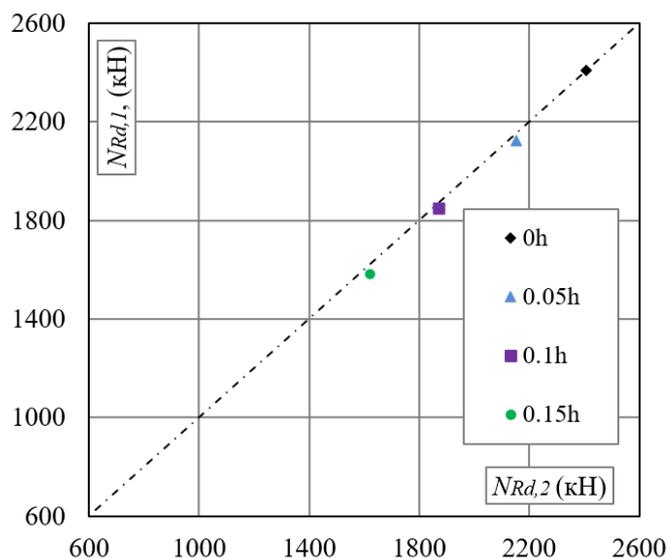


Рисунок 3. – Сравнение значений  $N_{Rd}$  при различных эксцентриситетах (0÷0,15*h*)

**Заключение.** Подтверждена возможность применения деформационного подхода к моделированию напряженно-деформированного состояния сжатых элементов из кирпичной кладки, усиленных под нагрузкой железобетонной обоймой, основанного на учете физической нелинейности материалов, составляющих поперечное сечение.

Сопоставление расчетных значений сопротивлений, вычисленных по зависимостям норм проектирования СП 1.04.03-2022 «Обследование и усиление каменных и армокаменных конструкций» и по предлагаемой методике, показывает их удовлетворительную сходимость (расхождения результатов вычисления прочности в предельной стадии не превышает 5%).

Предлагаемый деформационный подход, в отличие от прочностного, позволяет получать параметры напряженно-деформированного состояния на любой стадии деформирования усиленного элемента.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. Проектирование бетонных, железобетонных, каменных и армокаменных элементов и конструкций с применением диаграммных методов расчета. – М.: АСВ, 2019. – 194 с.
2. Соколов Б.С., Антаков А.Б. Аналитическая оценка напряженно-деформированного состояния каменных кладок при сжатии на основе авторской теории // Строит. материалы. – 2019. – № 9. – С. 51–55. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
3. Деформационный подход к вычислению расчетных значений сопротивления сжатию каменных и армокаменных элементов в рамках проверок предельного состояния несущей способности / А.М. Хаткевич, Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр.-во. Приклад. науки. – 2023. – № 2(34). – С. 2–9. DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-2-9.
4. 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.
5. Пильдиш М.Я., Поляков С.В. Каменные и армокаменные конструкции зданий. – 2-е изд., перераб. – М.: Гос. изд-во лит. по стр-ву и архитектуре, 1955. – 400 с.
6. Новожилова Н.С. Исследование напряженного состояния кирпичной кладки, усиленной железобетонной обоймой из легких бетонов // Строит. механика и расчет сооружений. – 2021. – № 6(299). – С. 13–18. DOI: 10.37538/0039-2383.2021.6.13.18.
7. Новожилова Н.С. Исследование напряженного состояния кирпичных стен, усиленных двухсторонним бетонным наращиванием, при местном сжатии // Вестн. гражд. инженеров. – 2021. – № 6(89). – С. 34–41. DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-34-41.
8. Пантелеев Н.Н., Спарина Г.П. К вопросу определения несущей способности каменных столбов, усиленных обоймами // Проектирование и стр-во в Сибири. – 2007. – № 5. – С. 22–23.
9. Бедов А.И. Несущая способность элементов из каменной кладки, усиленных сталефибробетонными обоймами // Пром. и гражд. стр-во. – 2016. – № 7. – С. 45–50.
10. Радаев А.В. Усиление каменной кладки железобетонной обоймой // Молодой ученый. – 2022. – № 48(443). – С. 42–46.
11. Новожилова Н.С., Рудаков Н.М. Анализ методов расчета кирпичной кладки, усиленной железобетонной обоймой, при местном краевом сжатии // Строит. механика и расчет сооружений. – 2023. – № 2(307). – С. 46–52. DOI: 10.37538/0039-2383.2023.2.46.52.

## REFERENCES

1. Karpenko, N.I., Sokolov, B.S. & Radaikin, O.V. (2019). *Proektirovanie betonnykh, zhelezobetonnykh, kamennykh i armokamennykh elementov i konstruktii s primeneniem diagrammykh metodov rascheta*. Moscow: ASV. (In Russ.).
2. Sokolov, B.S. & Antakov, A.B. (2019). Analiticheskaya otsenka napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya kamennykh kladok pri szhatii na osnove avtorskoi teorii [Analytical assessment of the stress-strain state of masonry under compression based on the author's theory]. *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, (9), 51–55. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-51-55.
3. Khatkevich, A.M., Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O. & Chaparanganda, E. (2023). Deformatsionnyi podkhod k vychisleniyu raschetnykh znachenii soprotivleniya szhatiyu kamennykh i armokamennykh elementov v ramkakh proverok predel'nogo sostoyaniya nesushchei sposobnosti [Deformation approach to calculating the calculated values of compressive resistance of stone and reinforced stone elements within the framework of testing the limit state of bearing capacity]. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya F, Stroitel'stvo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F, Construction. Applied Science]*, 34(2), 2–9. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.52928/2070-1683-2023-34-2-2-9.
4. Lazovskii, D.N. & Khatkevich, A.M. (2022). Deformatsionnyi podkhod k raschetu soprotivleniya szhatiyu armokamennykh elementov [Deformation approach to calculating the compression resistance of reinforced masonry elements]. *Vestnik MGSU [Bulletin of MGSU]*, 17(12), 1638–1652. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.12.1638-1652.
5. Pil'dish, M.Ya. & Polyakov, S.V. (1955). *Kamennye i armokamennye konstruktii zdaniy*. Moscow: Gosudarstvennoe izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu i arkhitekture. (In Russ.).
6. Novozhilova, N.S. (2021). Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya kirpichnoi kladki, usilennoi zhelezobetonnoi oboimoi iz legkikh betonov [Study of the stressed state of brickwork reinforced with a reinforced concrete frame made of lightweight concrete]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural mechanics and calculation of structures]*, 299(6), 13–18. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.37538/0039-2383.2021.6.13.18.
7. Novozhilova, N.S. (2021). Issledovanie napryazhennogo sostoyaniya kirpichnykh sten, usilennykh dvukhstoronnim betonnykh nashchi-vaniem, pri mestnom szhatii [Study of the stress state of brick walls reinforced with double-sided concrete build-up under local compression]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Vestnik civil engineers]*, 89(6), 34–41. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.23968/1999-5571-2021-18-6-34-41.
8. Panteleev, N.N. & Sparina, G.P. (2007). K voprosu opredeleniya nesushchei sposobnosti kamennykh stolbov, usilennykh oboimami [On the issue of determining the load-bearing capacity of stone pillars reinforced with clips]. *Proektirovanie i stroitel'stvo v Sibiri [Design and construction in Siberia]*, (5), 22–23. (In Russ., abstr. in Engl.).
9. Bedov, A.I. (2016). Nesushchaya sposobnost' elementov iz kamennoi kladki, usilennykh stalefibrobetonnyimi oboimami [Load-bearing capacity of masonry elements reinforced with steel-fiber-concrete frames]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]*, (7), 45–50. (In Russ., abstr. in Engl.).
10. Radaev, A.V. (2022). Usilenie kamennoi kladki zhelezobetonnoi oboimoi [Strengthening masonry with reinforced concrete frame]. *Molodoi uchenyi [Young scientist]*, 443(48), 42–46. (In Russ., abstr. in Engl.).
11. Novozhilova, N.S. & Rudakov, N.M. (2023). Analiz metodov rascheta kirpichnoi kladki, usilennoi zhelezobetonnoi oboimoi, pri mestnom kraevom szhatii [Analysis of methods for calculating brickwork reinforced with reinforced concrete frames under local edge compression]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii [Structural mechanics and calculation of structures]*, 2(307), 46–52. (In Russ., abstr. in Engl.). DOI: 10.37538/0039-2383.2023.2.46.52.

Поступила 08.12.2023

**A DEFORMATION APPROACH TO MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF COMPRESSED BRICKWORK ELEMENTS REINFORCED UNDER LOAD WITH A REINFORCED CONCRETE CAGE****A. KHATKEVICH<sup>1</sup>, D. LAZOUSKI<sup>2</sup>, D. GLUKHOV<sup>3</sup>****(<sup>1</sup>,<sup>2</sup>)Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk, <sup>3</sup>LLC «SoftClub», Minsk)**

*The article is devoted to modeling the stress-strain state of sections of short elements made of brickwork reinforced under load with a reinforced concrete cage. A feature of the modeling is the possibility of taking into account the physical nonlinearity of deformation of the brick hoard, concrete and longitudinal reinforcement of the cage, as well as the stress state before the start of reinforcement. The proposals on the sequence of calculation of the elements undergoing reinforcement, the solving equations of the general deformation method are given. A numerical study was performed on the example of a short element. As part of the checks of the limiting state of the bearing capacity, the values of compression resistance in the maximum strength stage were compared according to the current design standards and according to the proposed methodology. The calculation results confirmed the possibility of using a deformation model to calculate the parameters of the stress-strain state of short elements made of brickwork reinforced under load with a reinforced concrete cage.*

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