

УДК 666.982.4

**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОБЖАТИЯ СЕЧЕНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ
ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НАПРЯЖЕННОЙ ПОПЕРЕЧНОЙ АРМАТУРОЙ
ПРИ РАСЧЕТЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, УСИЛЕННЫХ В ЗОНЕ СРЕЗА**

д-р техн. наук, проф. Т.М. ПЕЦОЛЬД
(Белорусский национальный технический университет, Минск);
канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ
(Полоцкий государственный университет)

Приводится разработанная авторами методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры. Предлагаемая методика основана на базе общей деформационной модели, а также на положениях модифицированной теории полей сжатия и позволяет учесть в расчетах разность напряженно-деформированных состояний основной и дополнительной поперечной арматуры, степень предварительно напряженного состояния дополнительной поперечной арматуры, обжатие сечения дополнительной предварительно напряженной поперечной арматурой при передаче усилий предварительно напряженного элемента через жесткие стальные распределительные пластины либо прокатные профили.

Ключевые слова: *изгибаемые железобетонные элементы, зона среза, усиление, деформационная модель, обжатие сечения, дополнительная предварительно напряженная поперечная арматура.*

Введение. Реконструкция зданий и сооружений – одно из важнейших направлений строительной отрасли, интенсивно развивающееся в условиях растущей экономики Республики Беларусь и стран СНГ, где всё большее внимание уделяется модернизации и техническому перевооружению существующих промышленных предприятий и гражданских объектов. Вследствие вносимых изменений в действующие ТНПА в ряде случаев это изменяет и проектные условия эксплуатации зданий и сооружений и зачастую приводит к необходимости замены либо усиления строительных конструкций. Кроме того, необходимость усиления строительных конструкций может быть вызвана неблагоприятным воздействием внешней среды и физико-геологических процессов, авариями, нарушением условий нормальной эксплуатации, ошибками на стадиях проектирования и строительства, а также иными факторами.

Нередко в строительной практике при реконструкции возникает необходимость в усилении изгибаемых железобетонных элементов у опор, где кроме комбинации изгибающих моментов и продольных усилий, могут действовать значительные по величине поперечные усилия.

Совершенствование методов расчета усиленных строительных конструкций играет важную роль в повышении надежности и экономичности принятых решений. Перспективным направлением совершенствования методов расчета железобетонных конструкций является переход от эмпирических подходов с рассмотрением комбинации из одного-двух видов внутренних усилий к физическим моделям, учитывающим полную комбинацию действующих в рассматриваемом сечении (фрагменте) внутренних усилий. В настоящее время активно развивается модифицированная теория полей сжатия для расчета железобетонных конструкций при совместном действии поперечного, продольного усилий и изгибающего момента, основанная на деформационной модели с использованием диаграмм деформирования бетона, продольной и поперечной арматуры.

Известно, что изгибаемые железобетонные элементы, усиленные в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, имеют ряд особенностей деформирования и конструирования, заключающихся в наличии в железобетонных элементах при усилении начального напряженно-деформированного состояния от действия собственного веса, постоянных и временных нагрузок, различных по физико-механическим свойствам основной и дополнительной поперечной арматуры; обжатие сечения предварительно напряженной арматурой, что не учитывается в современных деформационных методах расчета зоны среза [5]. Использование таких методик при проектировании усиления строительных конструкций может приводить к перерасходу материалов и (или) недостаточной надежности усиленных элементов.

Предпосылки расчета. Системы уравнений НДС зоны среза элементов, усиленных в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры

Для работы под нагрузкой изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза путем установки дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, характерны две стадии:

первая стадия – работа под нагрузкой усиливаемого элемента при его усилении; вторая стадия – работа изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, после усиления.

Предлагаемая методика расчета усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов на первой стадии работы основывается на предпосылках, принятых для деформационной модели и модифицированной теории полей сжатия [1; 3; 6].

Авторами [3; 4] для предлагаемой методики расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза, на второй стадии работы вводятся дополнительные предпосылки.

Рассмотрим поперечное сечение изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза под нагрузкой. Согласно деформационной модели для плоской задачи, поперечное сечение железобетонного элемента рассматривается как совокупность элементарных площадок-слоев и продольных арматурных стержней основного и дополнительного элементов, в пределах которых нормальные напряжения считаются равномерно распределенными, равными средним значениям. Согласно модифицированной теории полей сжатия для изгибаемых железобетонных элементов распределение касательных напряжений по высоте элементарных площадок принимается равномерным, а поперечная арматура – равномерно распределенной вдоль продольной оси элемента. Степень поперечного армирования усиливаемого изгибаемого железобетонного элемента:

- для основного элемента до его усиления

$$\rho_{sy,0} = \frac{A_{sy}}{bs}; \quad (1)$$

где A_{sy} – соответственно площадь (мм^2), шаг поперечной арматуры усиливаемого элемента, мм;

- для дополнительной арматуры после усиления без увеличения поперечного сечения элемента

$$\rho_{sy,ad} = \frac{A_{sy,ad}}{bs_{ad}}. \quad (2)$$

На первой стадии работы (рисунок 1) параметры напряженно-деформированного состояния усиливаемого элемента в момент усиления определяются из решения системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} = N; \\ \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_0) + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_0) = M; \\ \sum_{i=1}^n \tau_{xy,i} b_i h_i = V; \\ \varepsilon_{x,i} = \frac{1}{r} (y_{c,i} - y_0) + \frac{N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i}}; \\ \sigma_{c1,i} = f(\varepsilon_{c1,i}); \quad \sigma_{c2,i} = f(\varepsilon_{c2,i}); \quad \sigma_{sx,i} = f(\varepsilon_{sx,i}); \quad \sigma_{sy,i} = f(\varepsilon_{sy,i}); \\ \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{c2,i} \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \sin^2 \theta_i; \\ \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cos^2 \theta_i; \\ \sigma_{cy,i} = \sigma_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{c1,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,0} \sigma_{sy,i}; \\ \tau_{xy,i} = (-\sigma_{c2,i} + \sigma_{c1,i}) \sin \theta_i \cos \theta_i; \\ \sigma_{cx,i} = \sigma_{c1,i} - \tau_{xy,i} / \tan \theta_i, \end{array} \right. \quad (3)$$

где $\sigma_{cx,i}$ – проекция на продольную ось нормальных напряжений в бетоне i -той элементарной площадки усиливаемого элемента, МПа; b_i , h_i – соответственно ширина, высота i -той элементарной площадки бетона усиливаемого элемента, мм; $A_{s,i}$ – площадь поперечного сечения i -того стержня продольной арматуры усиливаемого элемента, мм^2 ; $\sigma_{sx,i}$ – нормальные напряжения в продольной арматуре в i -том арматурном стержне усиливаемого элемента, МПа; N , M , V – соответственно продольное усилие (Н), изгибающий момент (Н·мм) и поперечное усилие (Н), действующие в сечении изгибаемого железобетонного элемента при усилении; $y_{c,i}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести i -той элементарной площадки бетона, мм; y_0 – рас-

стояние от выбранной оси до центра тяжести сечения усиляемого элемента, мм; $y_{s,i}$ – расстояние от выбранной оси до центра тяжести i -того стержня продольной арматуры, мм; $\tau_{xy,i}$ – касательные напряжения в i -той элементарной площадке сечения усиляемого элемента, МПа; $\epsilon_{x,i}$ – проекция относительных деформаций на продольную ось элемента в i -той элементарной площадке бетона, в i -том стержне продольной арматуры, мм/мм; $1/r$ – кривизна усиляемого элемента (1/мм):

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b_i h_i (y_{c,i} - y_0)^2 + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_0)^2}; \quad (4)$$

$E'_{c,i}$, $E'_{sx,i}$ – секущий модуль деформаций соответственно бетона i -той элементарной площадки, i -того стержня продольной арматуры усиляемого элемента, МПа; $\sigma_{c1,i}$, $\sigma_{c2,i}$ – соответственно главные растягивающие, главные сжимающие напряжения в i -той элементарной площадке бетона усиляемого элемента, МПа; $\epsilon_{c1,i}$, $\epsilon_{c2,i}$ – относительные деформации по направлению соответственно главных растягивающих, главных сжимающих напряжений в i -той элементарной площадке бетона усиляемого элемента с учетом поперечной арматуры, мм/мм; $\sigma_{sx,i}$, $\sigma_{sy,i}$ – соответственно нормальные напряжения в i -том стержне продольной арматуры, нормальные напряжения в поперечной арматуре в i -той элементарной площадке бетона, МПа; $\epsilon_{y,i}$ – проекция относительных деформаций на поперечную ось усиляемого элемента в i -той элементарной площадке бетона с учетом поперечной арматуры, мм/мм; θ_i – угол наклона главных напряжений по отношению к продольной оси элемента в i -той элементарной площадке бетона усиляемого элемента с учетом поперечной арматуры, рад; $\sigma_{cy,i}$ – проекция нормальных напряжений в бетоне i -той элементарной площадки на поперечную ось усиляемого элемента, МПа.

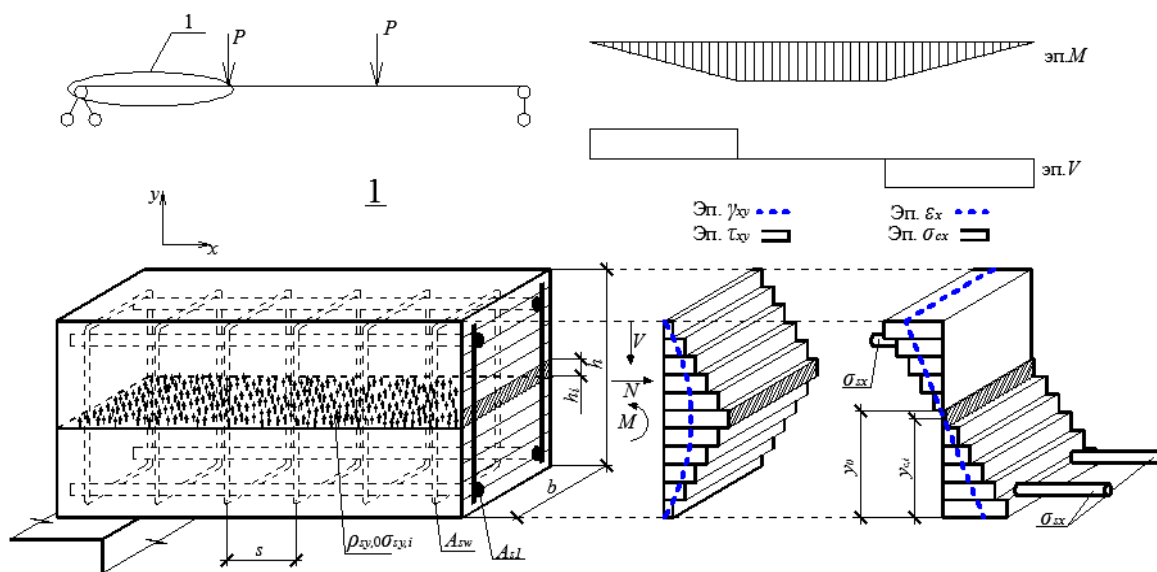


Рисунок 1. – Распределение касательных и нормальных напряжений и относительных деформаций в изгибаемом железобетонном элементе на первой стадии работы

Первые три уравнения в системе (3) являются условиями равновесия для рассматриваемого поперечного сечения в зоне среза усиляемого элемента, четвертое уравнение описывает распределение проекций относительных деформаций на продольную ось по высоте сечения элемента в соответствии с гипотезой плоских сечений. С пятого по восьмое уравнения системы (3) – принятые аппроксимации диаграмм деформирования соответственно бетона в условиях двухосного напряженно-деформированного состояния при растяжении, сжатии продольной и поперечной арматуры, девятое и десятое – уравнения совместности относительных деформаций для плоской i -той элементарной площадки. Три последних уравнения в системе (3) являются уравнениями равновесия для i -той элементарной площадки в поперечном и продольном направлениях в соответствии с модифицированной теорией полей сжатия.

При этом расчет параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента в зоне среза на первой стадии его работы выполняется от действия комбинации внутренних усилий (N , M , V), вызванных внешней нагрузкой в момент усиления. Решение системы уравнений (3)

позволяет получить распределение относительных деформаций растяжения-сжатия и сдвиговых деформаций, а также нормальных и касательных напряжений по высоте поперечного сечения элемента от действия внутренних усилий при усилении.

В случае усиления изгибаемого железобетонного элемента путем установки дополнительной поперечной арматуры с ее предварительным напряжением между первой и второй стадиями работы вводится дополнительная стадия, на которой параметры напряженно-деформированного состояния сечения изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, определяются воздействием комбинации внутренних усилий от внешней нагрузки в момент усиления и усилием обжатия дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры.

Усилие обжатия от дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры, согласно существующей практике, может передаваться на бетон усиливаемого элемента через жесткие стальные распределительные пластины либо прокатные профили. Как следствие, при отсутствии совместной работы элементов усиления с усиливаемым элементом предварительное напряжение в стержнях дополнительной поперечной арматуры имеет одинаковое значение.

Учитывая вышесказанное, можно допустить гипотезу о равномерности распределения вертикальных напряжений обжатия по усиленной зоне среза изгибаемого железобетонного элемента. Тогда система уравнений совместности относительных деформаций и уравнений равновесия в i -той элементарной площадке рассматриваемого сечения изгибаемого железобетонного элемента, усиленного дополнительной предварительно напряженной поперечной арматурой при жесткой равномерной передаче усилий предварительного обжатия на сечение элемента, имеет следующий вид [7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \varepsilon_{yp,i} = \varepsilon_{y,i[1]} - \frac{\sigma_{sy,p}}{E_{c,red}} \rho_{sy,ad} \cdot \varepsilon_{yp,ad} = \frac{\sigma_{sy,p}}{E_{sy,ad}}; \\ \varepsilon_{xp,i} = \varepsilon_{x,i[1]} + \frac{\sigma_{sy,p}}{E_{c,red}} \rho_{sy,ad} \mu; \\ \varepsilon_{xp,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \\ \varepsilon_{yp,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{c1,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \\ \sigma_{cy,i} = \sigma_{c2,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{c1,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,ad} \sigma_{sy,p} + \rho_{sy,0} \sigma_{sy,i}; \\ \tau_{xyp,i} = (-\sigma_{c2,i} + \sigma_{c1,i}) \cdot \sin \theta_i \cos \theta_i; \\ \sigma_{cx,i} = \sigma_{c1,i} - \tau_{xyp,i} / \tan \theta_i, \end{array} \right. \quad (5)$$

где $\sigma_{sy,p}$ – предварительное напряжение в дополнительной поперечной арматуре усиленного элемента, МПа; $\varepsilon_{yp,i}$ – проекция относительных деформаций в i -той элементарной площадке бетона с учетом относительных деформаций от действия усилия обжатия зоны среза дополнительной предварительно напряженной арматурой на поперечную ось, мм/мм; μ – коэффициент Пуассона; $\varepsilon_{yp,ad}$ – относительные деформации в дополнительной поперечной арматуре, соответствующие ее предварительному напряжению, мм/мм; $\varepsilon_{xp,i}$ – проекция относительных деформаций в i -той элементарной площадке бетона на продольную ось или относительные деформации в i -том стержне продольной арматуры усиленного дополнительной предварительно напряженной поперечной арматурой в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента, мм/мм; $E_{c,red}$ – приведенный модуль деформаций элемента в поперечном направлении (МПа), вычисляемый по формуле

$$E_{c,red} = \frac{E_c (bs - A_{sy}) + E_{sy} A_{sy}}{bs}, \quad (6)$$

где E_c , E_{sy} – соответственно модули деформаций бетона, стали поперечной арматуры изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза, МПа.

Система уравнений для напряженно-деформированного состояния поперечного сечения изгибаемого железобетонного элемента после усиления только дополнительной предварительно-напряженной поперечной арматурой в зоне среза на второй стадии приобретает следующий вид [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b h_i + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} = N + \Delta N; \\
 \sum_{i=1}^m \sigma_{cx,i} b h_i (y_{c,i} - y_{0,ad}) + \sum_{i=m+1}^n \sigma_{sx,i} A_{s,i} (y_{s,i} - y_{0,ad}) = M + \Delta M; \\
 \sum_{i=1}^n (\tau_{yp,i} + \tau_{y,ad,i}) b h_i = V + \Delta V; \\
 \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{yp,i} + \varepsilon_{x,ad,i}; \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{yp,i} + \varepsilon_{y,ad,i}; \\
 \varepsilon_{yp,ad} = \varepsilon_{yp,ad} + \sum_{i=1}^m \varepsilon_{y,ad,i}; \\
 \varepsilon_{x,ad,i} = \frac{1}{r_{ad}} (y_{c,i} - y_{0,ad}) + \frac{\Delta N}{\sum_{i=1}^m E'_{c,i} b h_i + \sum_{i=m+1}^n E'_{sx,i} A_{s,i}}; \\
 \sigma_{cl,i} = f(\varepsilon_{cl,i}); \sigma_{c2,i} = f(\varepsilon_{c2,i}); \sigma_{sx,i} = f(\varepsilon_{sx,i}); \sigma_{sy,i} = f(\varepsilon_{sy,i}); \sigma_{syp,ad} = f(\varepsilon_{syp,ad}); \\
 \varepsilon_{x,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{cl,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \varepsilon_{y,i} = \varepsilon_{c2,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{cl,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \\
 \varepsilon_{x,ad,i} = \varepsilon_{c2,ad,i} \cdot \cos^2 \theta_i + \varepsilon_{cl,ad,i} \cdot \sin^2 \theta_i; \varepsilon_{y,ad,i} = \varepsilon_{c2,ad,i} \cdot \sin^2 \theta_i + \varepsilon_{cl,ad,i} \cdot \cos^2 \theta_i; \\
 \sigma_{cy,ad,i} = \sigma_{c2,ad,i} \sin^2 \theta_i + \sigma_{cl,ad,i} \cos^2 \theta_i + \rho_{sy,0} \sigma_{sy,ad,i} + \rho_{syp,ad} \sigma_{syp,ad}; \\
 \tau_{y,ad,i} = (-\sigma_{c2,ad,i} + \sigma_{cl,ad,i}) \cdot \sin \theta_i \cos \theta_i; \\
 \sigma_{cx,i} = \sigma_{cl,i} - (\tau_{yp,i} + \tau_{y,ad,i}) / \tan \theta_i,
 \end{array} \right. \quad (7)$$

где $\varepsilon_{syp,ad}$, $\sigma_{syp,ad}$ – соответственно относительные деформации (мм/мм), напряжения в дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуре, МПа.

Последовательно увеличивая внутренние усилия в их комбинации, действующей в расчетном сечении, устанавливают значение, соответствующее образованию трещин в бетоне зоны среза. Нагрузка, при которой относительные деформации ε_{c1} по направлению главных растягивающих напряжений в бетоне достигают значения, соответствующего прочности бетона при растяжении по принятой диаграмме деформирования хотя бы в одной элементарной площадке основного или дополнительного бетона, соответствует началу образования трещин.

Прочность усиленного в зоне среза изгибаемого железобетонного элемента определяется методом последовательных нагружений [2]. Максимальное значение комбинации внутренних усилий от действующей нагрузки, при котором выполняются все условия системы уравнений (7), соответствует прочности в рассматриваемом сечении изгибаемого железобетонного элемента, усиленного в зоне среза. Для определения наиболее опасного сечения в зоне среза рассматриваются несколько сечений по длине зоны среза с различной комбинацией действующих внутренних усилий M , N , V .

Основные выводы

Разработанная авторами методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза при действии полной комбинации внутренних усилий для полного плоского напряженного состояния, позволяет учесть дополнительные усилия от обжатия сечения дополнительной предварительно напряженной поперечной арматурой. Предлагаемая методика позволяет учесть начальное напряженно-деформированное состояние усиливаемых в зоне среза элементов, различные физико-механические и геометрические характеристики усиливаемой и усиливающей частей элемента, а также эффект предварительного напряжения дополнительной поперечной арматуры при передаче усилий предварительного напряжения на бетон усиливаемого элемента через жесткие стальные распределительные пластины либо прокатные профили.

ЛИТЕРАТУРА

1. Vecchio, F.J. Analysis based on the Modified Compression Field Theory / F.J. Vecchio // IABSE Colloq. On Structural Concrete. – Report, V. 62. – Stuttgart, 1991. – P. 321–326.

2. Применение мягких вычислений для сглаживающей аппроксимации сложных сингулярных зависимостей / Д.О. Глухов [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. – 2012. – № 12. – С. 2–5.
3. Лазовский, Е.Д. Предпосылки, методика и программа для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных в зоне среза изгибаемых железобетонных элементов / Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2013. – № 16. – С. 33–39.
4. Пецольт, Т.М. Методика расчета изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза / Т.М. Пецольт, Е.Д. Лазовский, Д.О. Глухов // Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. – 2012. – № 16. – С. 40–45.
5. Усиление железобетонных конструкций : пособие П1-98 к СНиП 2.03.01-84* / Минстройархитектуры Респ. Беларусь. – Минск, 1998. – 189 с.
6. Тур, В.В. Расчет железобетонных конструкций при действии перерезывающих сил / В.В. Тур, А.А. Кондратчик. – Брест : БрГТУ, 2000. – 397 с.
7. Лазовский, Е.Д. Расчет изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в зоне среза / Е.Д. Лазовский, Т.М. Пецольт // Архитектура, строительство, транспорт : материалы междунар. науч.-практ. конф. – Омск : СибАДИ, 2015. – С. 311–319.
8. Лазовский, Е.Д. Напряженно-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов, усиленных установкой дополнительной предварительно напряженной поперечной арматуры / Е.Д. Лазовский, А.И. Колтунов // Проблемы современного бетона и железобетона : сб. науч. тр. – Минск : БелНИИС, 2014. – С. 198–207.

Поступила 04.12.2017

**CONSIDERATION OF THE SECTION COMPRESSION EFFECT OF AN ADDITIONAL
PRESTRESSED TRANSVERSE REINFORCEMENT IN THE CALCULATION OF BENT RC
ELEMENTS STRENGTHENED IN THE SHEAR ZONE**

T. PETSOLD, Y. LAZOUSKI

This article describes the method developed by the authors for calculating bent reinforced concrete elements strengthened in the shear zone by installing additional prestressed transverse reinforcement. The method proposed by the authors is based on the general deformation model and also on the positions of the modified compression field theory and allows one to take into account the difference in the stress-strain states of the main and additional transverse reinforcement, the prestress of additional transverse reinforcement, the compression of the section by an additional prestressed transverse reinforcement during transmission forces of prestressing on the concrete of the reinforced element through rigid steel distribution boards astina or rolling profiles.

Keywords: *flexible reinforced concrete elements, the area of the cut, gain, the deformation model, compression sections, the additional pre-stressed transverse reinforcement.*