

УДК 624.012.45

DOI 10.52928/2070-1683-2022-31-8-75-80

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ УСИЛЕННЫХ В РАСТЯНУТОЙ ЗОНЕ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ДЕЙСТВИИ ДЛИТЕЛЬНОЙ НАГРУЗКИ**

*д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ,  
канд. техн. наук, доц. Д.О. ГЛУХОВ, канд. техн. наук, доц. Е.Д. ЛАЗОВСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет)*

*В данной статье приводятся предложения по совершенствованию метода расчета параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне, с учетом эффектов ползучести бетона под действием длительно действующей нагрузки. За основу принимается общая нелинейная деформационная модель расчета железобетонных элементов при совместном действии изгибающих моментов и продольных сил, использующая математическое описание диаграмм деформирования бетона и арматуры. Предлагаемая расчетная модель позволяет учесть эффекты изменения деформаций в бетоне под действием длительно действующей нагрузки. Экспериментальная проверка показала удовлетворительную сходимость результатов расчета по предлагаемой методике с опытными данными.*

**Ключевые слова:** железобетон, усиление, ползучесть бетона, общая нелинейная деформационная модель.

**Введение.** Повышение несущей способности эксплуатируемых железобетонных конструкций предполагает выявление при обследовании и усиление их наиболее слабой зоны. Применительно к изгибаемым железобетонным элементам, в зависимости от степени армирования, это может быть растянутая или сжатая зона, зона среза. Для сборно-монолитных изгибаемых элементов – зона контакта сборной и монолитной частей. Если не удастся достичь необходимой степени повышения несущей способности элемента усилением только одной зоны, прибегают к комбинированному усилению двух и более зон.

Усиление изгибаемых железобетонных элементов в растянутой зоне предполагает установку дополнительной арматуры с обеспечением ее совместной работы с усиливаемым элементом приваркой к его оголенной арматуре с последующим обетонированием или приклеиванием полимерраствором к бетону растянутой зоны листовой арматуры, а также размещением стержневой арматуры в предварительно выполненных пазах и последующим заполнением их полимерраствором.

Перед усилением под нагрузкой, с частичным или полным разгрузением, эксплуатируемые железобетонные конструкции имеют напряженно-деформированное состояние, отличное от первоначального после изготовления конструкций. Это связано с предысторией их работы за период эксплуатации до момента усиления.

Дополнительные элементы, включаемые в совместную работу с усиливаемой конструкцией, имеют разный возраст, разные физико-механические и реологические характеристики, включаются в работу в разные моменты времени. Фактически конструкция после усиления превращается в многокомпонентную конструкцию, состоящую из основной части, находящейся в определенном напряженно-деформированном состоянии, и дополнительной части, находящейся в первоначальном состоянии.

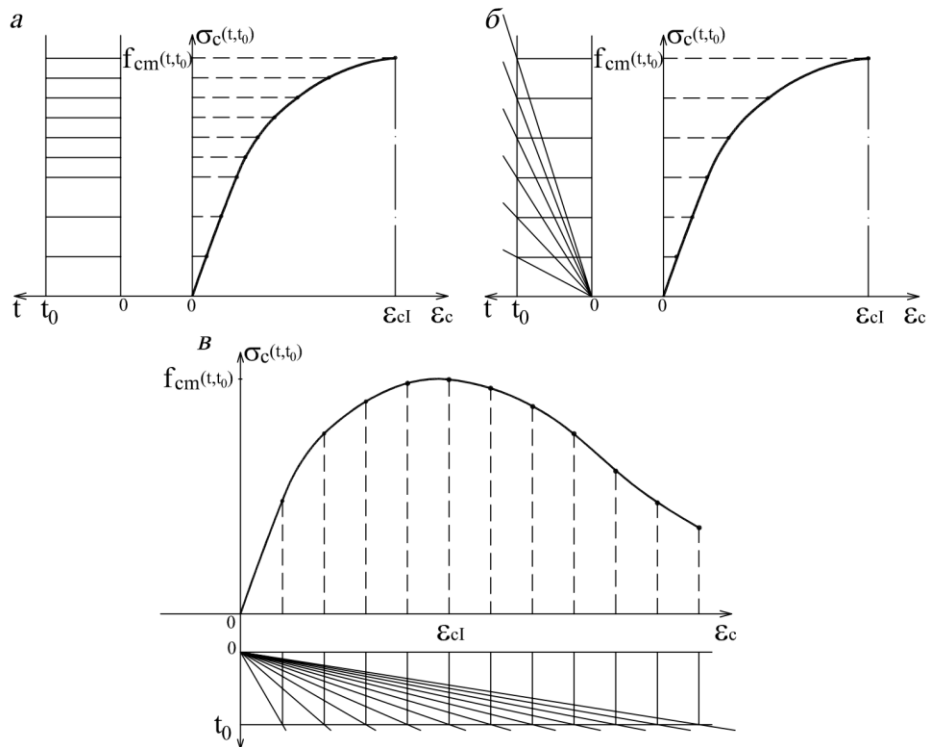
**Расчетные диаграммы деформирования бетона при длительном нагружении.** Общий метод расчета поперечных сечений железобетонных элементов на основе деформационной расчетной модели позволяет получить параметры их напряженно-деформированного состояния, в том числе и элементов, усиленных дополнительными арматурой и бетоном под нагрузкой [1, с. 72]. Для расчета напряженно-деформированного состояния усиленных конструкций необходимо знать геометрические, физико-механические и реологические характеристики их бетона и арматуры, а также бетона и арматуры дополнительных элементов усиления, момент времени и режим нагружения конструкции после усиления.

Диаграммы деформирования бетона, которые используются в деформационной расчетной модели поперечных сечений железобетонных элементов, представляют собой аппроксимацию результатов экспериментальных исследований и относятся к случаю кратковременного нагружения. Экспериментальные диаграммы деформирования бетона при этом получают на стандартных призмах (цилиндрах), испытываемых с постоянной скоростью роста деформаций 2‰ в час. При ступенчатом нагружении величина двух первых ступеней составляет 0.05 от ожидаемого предельного усилия, затем величина ступеней увеличивается вдвое. Начиная со ступени 0.85 от ожидаемого предельного усилия все последующие ступени нагружения снова уменьшают вдвое. На каждой ступени нагрузка выдерживается постоянной 4...5 мин [2].

Расчетные диаграммы деформирования бетона эксплуатируемых конструкций для случая кратковременного нагружения принимают по аналитическим зависимостям и параметрам их базовых точек, прямо или косвенно установленным при их обследовании.

Для вычисления параметров напряженно-деформированного состояния железобетонных элементов в случае длительного нагружения, когда проявляются деформации ползучести бетона и его контакта с арматурой, применяют диаграммы-изохроны [3–5].

Диаграмму-изохрону можно получить экспериментально [6; 7], если нагружать одновременно несколько одинаковых образцов бетона при разных уровнях напряжений в течение одинакового отрезка времени (рисунок 1, а) или нагружать образцы с постоянной скоростью роста напряжений (рисунок 1, б). Если нагружение образцов бетона производить с постоянной скоростью роста деформаций, то экспериментально можно получить нисходящую ветвь диаграммы-изохроны (рисунок 1, в).



*a* – ступенчатом; *б* – с постоянной скоростью роста напряжений; *в* – с постоянной скоростью роста деформаций  
Рисунок 1. – Диаграммы-изохроны бетона при длительном нагружении

Получение диаграмм деформирования бетона при длительном нагружении экспериментальным путем аналогично кратковременному нагружению является сложным вследствие большого количества факторов, влияющих на ползучесть бетона (каждому составу бетона, условиям его твердения, режиму работы соответствует своя деформация ползучести). Поэтому для получения диаграмм деформирования бетона с учетом длительности действия нагрузки используют известные феноменологические теории ползучести, полученные на основе экспериментальных данных при простейших режимах нагружения и последующих обобщений на основе принятых гипотез [8]. Основная гипотеза, используемая для получения зависимости « $\sigma_c(t, t_0) - \varepsilon_c(t, t_0)$ » для бетона, заключается в следующем: полные деформации бетона складываются из упругих деформаций, возникающих при кратковременном приложении нагрузки, и деформаций ползучести, развивающихся при длительном действии нагрузки.

По виду зависимостей между напряжениями и деформациями ползучести различают линейную и нелинейную теории ползучести. Область линейной зависимости, как правило, ограничивается определенным уровнем напряжений в бетоне. Например, в нормативном документе [8] область линейной зависимости ограничивается  $\sigma_c \leq 0,4f_{cm}(t_0)$ . Коэффициент ползучести бетона (соотношение деформаций ползучести и упругих деформаций при одной и той же величине приложенного напряжения) в этом случае определяют по формуле

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_{bc}(t, t_0) + \varphi_{dc}(t, t_0), \quad (1)$$

где  $\varphi_{bc}(t, t_0)$  – базовый коэффициент ползучести;

$\varphi_{dc}(t, t_0)$  – коэффициент ползучести высыхания;

$t$  – возраст бетона в рассматриваемый момент времени, сут;

$t_0$  – модифицированный в зависимости от температуры среды и класса прочности цемента возраст бетона в момент нагружения, сут.

В случае высоких уровней сжимающих напряжений в интервале  $0,4f_{cm}(t_0) < \sigma_c < 0,6f_{cm}(t_0)$  определяют модифицированный коэффициент нелинейной ползучести  $\varphi_\sigma(t, t_0)$  по формуле

$$\varphi_\sigma(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \exp[1,5 \cdot (k_\sigma - 0,4)], \quad (2)$$

где  $0,4 < k_\sigma = \frac{|\sigma_c|}{f_{cm}(t_0)} < 0,6$  – коэффициент, учитывающий уровень нагружения за пределами области линейной зависимости.

Кроме того, согласно [8], относительные деформации ползучести бетона  $\varepsilon_{cc}(t, t_0)$  с начальным модулем упругости  $E_c = 1,05E_{cm}$  железобетонных элементов в момент времени  $t$  при постоянных напряжениях  $\sigma_c$ , приложенных в возрасте бетона  $t_0$ , определяются по формуле

$$\varepsilon_{cc}(t, t_0) = \varphi(t, t_0) \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}. \quad (3)$$

Значения эффективного модуля деформаций бетона  $E_{c,eff}(t, t_0)$  с учетом длительного действия нагрузки в момент времени  $t$  при действии напряжения  $\sigma_c \leq 0,4f_{cm}(t_0)$  могут быть вычислены по формуле

$$E_{c,eff}(t, t_0) = E_{cm} / [1 + \varphi(t, t_0)]. \quad (4)$$

При напряжениях в бетоне  $\sigma_c > 0,4f_{cm}(t_0)$  в формуле (4) применяют модифицированный коэффициент нелинейной ползучести  $\varphi_\sigma(t, t_0)$ .

Полученные значения эффективного модуля деформаций бетона при разных уровнях напряжения в момент времени  $t$  аппроксимируются кривой, которая является диаграммой-изохроной в заданный момент времени. Кроме того, диаграмму-изохрону можно получить, суммируя относительные деформации ползучести бетона, вычисленные по формуле (3), с упругими относительными деформациями бетона при разных уровнях напряжения в момент времени  $t$ . Все точки диаграммы-изохроны бетона при нарастании длительной нагрузки для разных уровней напряжений достигают своих значений за одинаковый промежуток времени. Полученные таким образом диаграммы деформирования бетона основной и дополнительной частей усиленного железобетонного элемента, учитывающие его ползучесть под нагрузкой, применяют в расчете деформаций железобетонных элементов при длительном действии нагрузки.

**Расчет параметров напряженно-деформированного состояния изгибаемых железобетонных элементов при длительном нагружении.** Система уравнений деформационной модели для расчетного поперечного сечения изгибаемого в одной плоскости железобетонного элемента, состоящая из уравнений равновесия и условия совместности деформаций, описывающего положение плоскости распределения деформаций по поперечному сечению в соответствии с гипотезой плоских сечений, на первом этапе расчета учитывающая предысторию длительного нагружения, имеет вид:

$$\begin{cases} \int \sigma(t_0)A[y - y_0(t_0)]dy = M(t_0) \\ \int \sigma(t_0)A dy = 0 \\ \varepsilon(t_0) = \frac{1}{r}(t_0)[y - y_0(t_0)] \end{cases}, \quad (5)$$

где  $\sigma(t_0)$  и  $M(t_0)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры и изгибающий момент от внешних воздействий в момент времени усиления элемента;

$\varepsilon(t_0)$  и  $\frac{1}{r}(t_0)$  – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры и кривизна элемента в рассматриваемом поперечном сечении в момент времени усиления элемента;

$A$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона или арматуры железобетонного элемента.

На втором этапе расчета с учетом наличия основной и дополнительной части усиленного элемента и жесткого контакта между ними, условий равновесия усилий и условий совместности деформирования для усиленного поперечного сечения в момент времени  $t$  уравнения напряженно-деформированного состояния изгибаемого железобетонного элемента, усиленного увеличением поперечного сечения, имеют вид:

$$\begin{cases} \int \sigma(t)A[y - y_0(t)]dy + \sigma_{ad}(t)A_{ad}[y - y_{0,ad}(t)]dy = M(t_0) + \Delta M(t) \\ \int \sigma(t)A dy + \sigma_{ad}(t)A_{ad} dy = 0 \\ \varepsilon(t) = \frac{1}{r}(t_0)[y - y_0(t_0)] + \frac{1}{r_{ad}}(t)[y - y_{0,ad}(t)] \\ \varepsilon_{ad}(t) = \frac{1}{r_{ad}}(t)[y - y_{0,ad}(t)] \end{cases}, \quad (6)$$

где  $\sigma(t)$  и  $\Delta M(t)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры основной части элемента и приращение изгибающего момента от внешних воздействий в момент времени  $t$  после усиления элемента;

$\sigma_{ad}(t)$  – нормальные напряжения в элементарной площадке бетона или арматуры дополнительной части элемента;

$\varepsilon(t)$  – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры основной части усиленного элемента в рассматриваемом поперечном сечении в момент времени  $t$  после усиления элемента;

$\varepsilon_{ad}(t)$  и  $\frac{1}{r_{ad}}(t)$  – относительная деформация в элементарной площадке бетона или арматуры и кривизна дополнительной части усиленного элемента в рассматриваемом поперечном сечении в момент времени  $t$  после усиления элемента;

$A_{ad}$  – площадь поперечного сечения элементарной площадки бетона или арматуры дополнительной части усиленного железобетонного элемента.

С учетом аппроксимаций диаграмм-изохрон для бетона и диаграмм деформирования арматуры основной и дополнительной части усиленного элемента при длительном действии нагрузки вычисляются напряжения в элементарных площадках. Процесс итераций продолжается до получения заданной точности вычисления в условиях равновесия усилий (6).

При необходимости получения несущей способности усиленного элемента нагрузка ступенчато увеличивается. Максимальное усилие от внешней нагрузки, при котором выполняются условия (6), соответствует несущей способности усиленного элемента.

Если железобетонный элемент, находящийся под длительным силовым воздействием, после усиления под нагрузкой догружается кратковременной нагрузкой, то в диаграммах деформирования бетона усиливаемой конструкции учитывается изменение физико-механических свойств бетона вследствие предыстории нагружения до усиления. Изменения свойств бетона связано с природой ползучести, деструктивными процессами при увеличении нагрузки и перемене ее знака. Учет предыстории нагружения бетона производится трансформированием принятой для кратковременного нагружения аппроксимации диаграммы с помощью коэффициентов условий работы бетона [9].

**Экспериментальная проверка.** Экспериментально-теоретическое исследование включало испытание опытной балки, усиленной увеличением поперечного сечения в растянутой зоне, при действии длительной нагрузки и расчеты на основе разработанной методики.

Балка имела прямоугольное поперечное сечение размером  $80 \times 160$  мм и длину 1500 мм. Балка была усилена в растянутой зоне приваркой дополнительной арматуры к существующей с последующим обетонированием. Совместная работа дополнительной арматуры в растянутой зоне усиливаемой опытной балки обеспечивалась приваркой ее по концам к арматуре основной конструкции через коротышки диаметром 12 мм с последующим обетонированием. Совместная работа дополнительного бетона в растянутой зоне с бетоном основной части усиленной балки достигалась насечкой глубиной до 10 мм контактной поверхности растянутой грани перед обетонированием.

Размер и армирование опытной балки определялся мощностью имеющихся пружинных установок для создания длительной нагрузки.

Для приготовления бетона применялся портландцемент марки 500 Кричевского цементного завода. В качестве крупного заполнителя использовался гранитный щебень фракции 5...25 мм. В качестве мелкого заполнителя – кварцевый песок карьера Боровое с объемным весом  $1530 \text{ кг/м}^3$  и модулем крупности 1,62. Бетонная смесь для бетонирования опытной балки приготавливалась с осадкой конуса 3...5 см и водоцементным отношением  $V/C = 0,5$ . Для обетонирования дополнительной арматуры после усиления применялся мелкозернистый бетон с суперпластификатором. Прочностные и деформационные характеристики бетона основной и дополнительной части опытной балки соответственно:  $f_{cm} = 11,2$  МПа,  $f_{ctm} = 1,2$  МПа,  $E_{cm} = 23$  ГПа и  $f_{ctm} = 2,14$  МПа,  $E_{cm} = 32,5$  ГПа.

В качестве продольной арматуры опытной балки использовалась горячекатаная стержневая арматура периодического профиля диаметром 12 мм ( $A_s = 113,2 \text{ мм}^2$ ,  $\sigma_y = 448$  МПа,  $\sigma_u = 640$  МПа,  $E_s = 2,08 \cdot 10^5$  МПа). Дополнительная арматура при усилении растянутой зоны опытной балки была принята диаметром 10 мм ( $A_s = 78,2 \text{ мм}^2$ ,  $\sigma_y = 340$  МПа,  $\sigma_u = 516$  МПа,  $E_s = 2,1 \cdot 10^5$  МПа).

При испытании бетонных призм на сжатие и образцов арматуры на растяжение, кроме основных прочностных и деформационных показателей, определялись диаграммы деформирования бетона для восходящей ветви и арматуры.

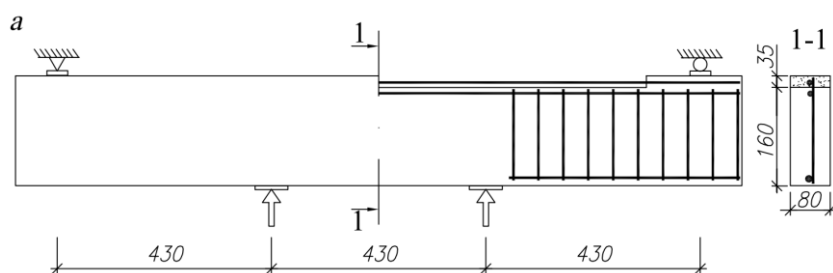
Опытная балка, возраст бетона которой составлял 28 сут, усиленная приваркой дополнительной арматуры в растянутой зоне без предварительного нагружения ( $M/M_u = 0$ ), была испытана длительной нагрузкой, уровень которой составлял  $M/M_{ad,u} = (0,25; 0,75)$ . Длительность испытания балки под нагрузкой на каждой ступени в зависимости от характера нарастания прогибов составляла 30 и 53 сут. Для определения характеристики ползучести одновременно под длительную нагрузку в стандартные пружинные установки были установлены 4 бетонные призмы размером  $100 \times 100 \times 400$  мм из бетона замеса опытной балки, нагруженные до уровня  $\sigma_c/f_{cm} = (0,4; 0,6; 0,7; 0,85)$ . Испытания длительной нагрузкой проводили в течении 83 сут. Это позволило получать основные точки диаграммы изохроны для бетона опытной балки на протяжении всего ее испытания.

Деформации бетона и продольной арматуры (основной и дополнительной) опытных балок измерялись с помощью механических тензометров, индикаторов часового типа, а также прогибомеров. Прогибы опытной балки измерялись с помощью прогибомеров.

С целью удобства испытание опытной балки производилось на испытательном стенде с ориентацией растянутой грани балки вверх. Конструкция опытной балки и схема ее испытания при действии длительной нагрузки с расположением измерительных приборов приведены на рисунке 2.

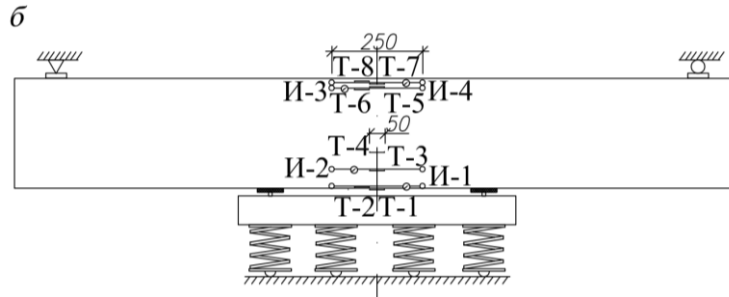
Экспериментальная проверка метода расчета при длительном нагружении изгибаемых железобетонных элементов, усиленных увеличением поперечного сечения в растянутой зоне, состояла в сопоставлении опытных и расчетных значений относительных деформаций основной и дополнительной арматуры, кривизны опытной балки.

Расчет параметров напряженно-деформированного состояния усиленной балки в заданный момент времени при принятом режиме длительного нагружения производился в двух вариантах: 1) по фактическим диаграммам-изохронам для бетона, полученным экспериментально (учитывая уровень нагружения при испытании опытной балки, для расчета достаточно было восходящей ветви); 2) по расчетным диаграммам-изохронам, полученным на основе формул (1–4). При испытании опытной балки длительно действующей нагрузкой за первоначальное состояние принято напряженно-деформированное состояние усиленной балки перед нагружением. Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных значений относительных деформаций основной и дополнительной арматуры, кривизны усиленного элемента показывает удовлетворительную сходимость (рисунок 3).



**a** – конструкции опытной балки

**Рисунок 2.** – Схема испытания опытной железобетонной балки, усиленной в растянутой зоне (начало)



б – схема длительных испытаний, расположение тензометров (Т), индикаторов (И)

Рисунок 2. – Схема испытания опытной железобетонной балки, усиленной в растянутой зоне (окончание)

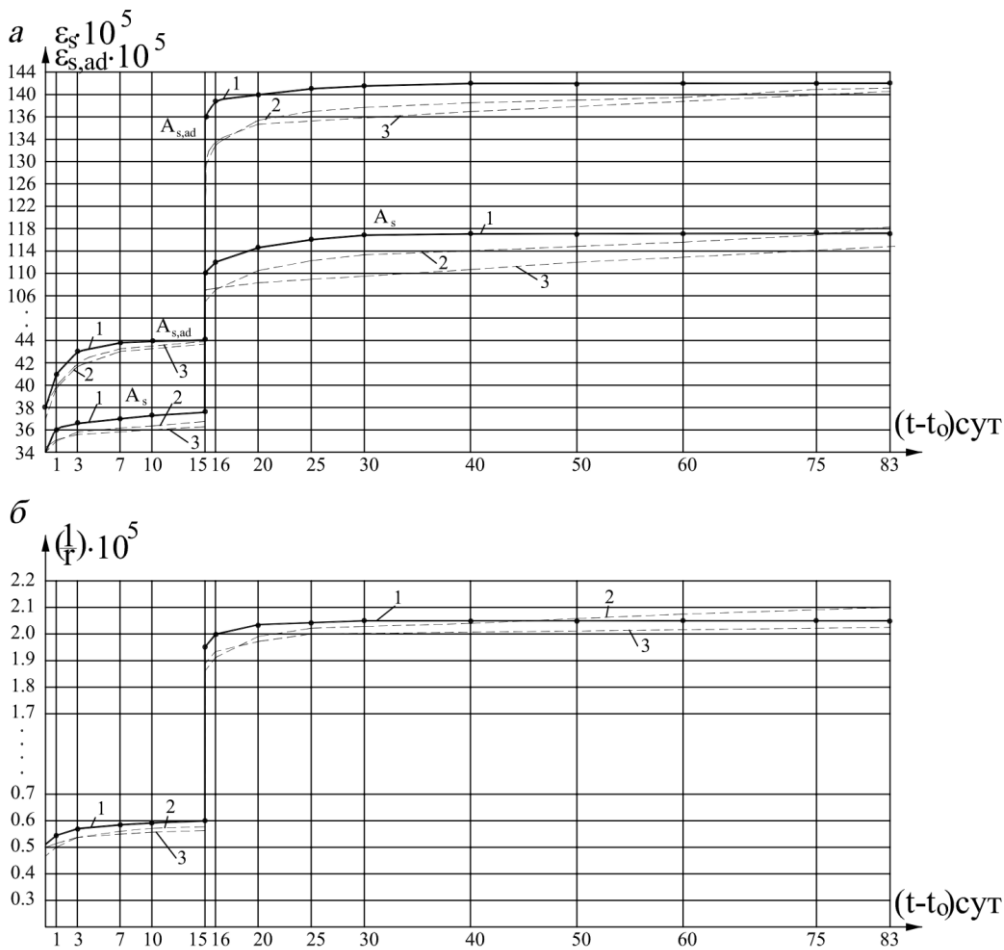


Рисунок 3. – Сопоставление при длительном нагружении балки опытных и расчетных значений: относительных деформаций основной и дополнительной арматуры (а); кривизны (б): 1 – опытные значения; 2 – расчетные по экспериментальным диаграммам; 3 – расчетные по расчетным диаграммам

**Заключение.** Общий метод расчета на основе деформационной расчетной модели поперечных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных в растянутой зоне, позволяет получить параметры их напряженно-деформированного состояния при длительном действии нагрузки.

Экспериментальная проверка методики расчета изгибаемых элементов, усиленных в растянутой зоне, при длительном приложении нагрузки показала удовлетворительную сходимость результатов расчета по опытным диаграммам-изохронам и расчетным в соответствии с действующим нормативным документом<sup>1</sup>.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лазовский, Д.Н. Общий метод расчета прочности и деформаций на основе нелинейной деформационной модели косо сжатых колонн, усиленных железобетонной обоймой / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, Е.Д. Лазовский // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Стр-во. Прикладные науки. – 2021. – № 16. – С. 72–79.

<sup>1</sup> Бетонные и железобетонные конструкции : СП 5.03.01-2020. – Введ. 20.05.22. – Минск : М-во архитектуры и стр-ва Республики Беларусь, 2020. – 236 с.

2. Лазовский, Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений / Д.Н. Лазовский. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т. – 1998. – 240 с.
3. Карпенко, Н.И. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры / Н.И. Карпенко, Т.А. Мухамедиев, А.Н. Петров // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций : сб. науч. тр. – М. : НИИЖБ, 1986. – С. 7–25.
4. Статически неопределимые железобетонные конструкции. Диаграммные методы автоматизированного расчета и проектирования : метод. пособие / Н.И. Карпенко [и др.]. – М. : М-во стр-ва и жилищно-коммунального хоз-ва Российской Федерации, 2017. – 197 с.
5. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский [и др.] // Вестн. Брестского гос. техн. ун-та. – 2021. – № 2 (125). – С. 7–12.
6. Яшин, А.В. Методические рекомендации по определению основных механических характеристик бетонов при кратковременном и длительном нагружении / А.В. Яшин. – М. : НИИЖБ, 1984. – 52 с.
7. Александровский, С.В. Методические рекомендации по исследованию ползучести и усадки бетона / С.В. Александровский, В.В. Соломонов. – М. : НИИЖБ, 1975. – 118 с.
8. Бондаренко, В.М. Инженерные методы нелинейной теории железобетона / В.М. Бондаренко, С.В. Бондаренко. – М. : Стройиздат, 1982. – 287 с.
9. Макаренко, Л.П. Изменение физико-механических свойств бетонов при сжатии и растяжении при повторных нагружениях / Л.П. Макаренко // Бетон и железобетон. – 1989. – № 2. – С. 38–40.

## REFERENCES

1. Lazovskii, D.N., Glukhov, D.O. & Lazovskii, E.D. (2021). Obshchii metod rascheta prochnosti i deformatsii na osnove nelineinoi deformatsionnoi modeli koso szhatykh kolonn, usilennykh zhelezobetonnoi oboimoi [General method based on a nonlinear deformation model for strength and deformations analysis of eccentrically compressed concrete columns, strengthened with a reinforced concrete section enlargement]. *Vestn. Polots. gos. un-ta. Ser. F, Str-vo. Prikladnye nauki [Vestnik of Polotsk State University. Part F. Constructions. Applied Sciences]*, (16), 72–79. (In Russ., abstr. in Engl.).
2. Lazovskii, D.N. (1998). *Usilenie zhelezobetonnykh konstruksii ekspluatiruemykh stroitel'nykh sooruzhenii*. Novopolotsk: Polots. gos. un-t. (In Russ.).
3. Karpenko, N.I., Mukhamediev, T.A. & Petrov, A.N. (1986). *Iskhodnye i transformirovannye diagrammy deformirovaniya betona i armatury*. In *Napryazhenno-deformirovanное sostoyanie betonnykh i zhelezobetonnykh konstruksii*: sb. nauch. tr. (7–25). Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
4. Karpenko, N.I., Travush, V.I., Karpenko, S.N., Petrov, A.N., Chepizubov, I.G., Eryshev, V.A., ... Yarin, L.I. (2017). *Sticheski neopredelimeye zhelezobetonnye konstruksii. Diagrammnye metody avtomatizirovannogo rascheta i proektirovaniya*. Moscow: M-vo str-va i zhilishchno-kommunal'nogo khoz-va Rossiiskoi Federatsii. (In Russ.).
5. Lazovskii, D.N., Tur, V.V., Glukhov, D.O. & Lazovskii, E.D. (2021). Uchet polzuchesti i usadki betona po SP 5.03.01-2020 pri raschete zhelezobetonnykh konstruksii na osnove deformatsionnoi raschetnoi modeli [Creep and shrinking of concrete accounting according to SP 5.03.01-2020 when analysis of reinforced concrete structures based on deformational analytical model]. *Vestn. Brestskogo gos. tekhn. un-ta [Vestnik of Brest State Technical University]*, (2), 7–12. (In Russ., abstr. in Engl.).
6. Yashin, A.V. (1984). *Metodicheskie rekomendatsii po opredeleniyu osnovnykh mekhanicheskikh kharakteristik betonov pri kratkovremennom i dlitel'nom nagruzhenii*. Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
7. Aleksandrovskii, S.V. & Solomonov, V.V. (1975). *Metodicheskie rekomendatsii po issledovaniyu polzuchesti i usadki betona*. Moscow: NIIZhB. (In Russ.).
8. Bondarenko, V.M. & Bondarenko, S.V. (1982). *Inzhenernye metody nelineinoi teorii zhelezobetona*. Moscow: Stroiizdat. (In Russ.).
9. Makarenko, L.P. (1989). *Izmenenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv betonov pri szhatii i rastyazhenii pri povtornykh nagruzheniyakh. Beton i zhelezobeton*, (2), 38–40. (In Russ.).

Поступила 04.05.2022

## MODELING OF THE BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE ELEMENTS, STRENGTHENED IN THE TENSIONED ZONE, UNDER THE ACTION OF A LONG-TERM LOAD

D. LAZOUSKI, D. GLUHAU, Y. LAZOUSKI

*This article provides suggestions for improving the method for analysis of the parameters of the stress-strain state of bent reinforced concrete elements, strengthened in the tension zone, taking into account the effects of concrete creep under a long-term load. The general non-linear deformation model for structural analysis of reinforced concrete elements under the combined action of bending moments and longitudinal forces is taken as a basis, using a mathematical description of the deformation diagrams of concrete and reinforcement. The proposed model makes it possible to take into account the effects of changes in deformations in concrete under the action of a long-term load. Experimental verification showed a satisfactory convergence of the results of the analysis by the proposed method with the experimental data.*

**Keywords:** reinforced concrete, strengthening, concrete creep, general nonlinear deformation model.