

УДК 624.012

DOI 10.52928/2070-1683-2025-41-2-13-22

**ОЦЕНКА ПРОЧНОСТИ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ КНИГОХРАНИЛИЩА
НАЦИОНАЛЬНОЙ БИБЛИОТЕКИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ***д-р техн. наук, проф. Д.Н. ЛАЗОВСКИЙ¹⁾, Л.М. ШОХИНА²⁾, А.В. ПОПРАВКО³⁾, Т.М. ГЛУХОВА⁴⁾**(^{1), 4)} Полоцкий государственный университет имени Евфросинии Полоцкой,
²⁾ ОАО «Минскпроект», ³⁾ Проектный институт реконструкции и строительства, Новополоцк)
¹⁾ d.lazovski@psu.by, ³⁾ a.popravko@psu.by, ⁴⁾ dzmitry.hlukhau@outlook.com*

Уникальное здание Национальной библиотеки Республики Беларусь включает в себя не только градостроительные, архитектурные, технологические современные решения, но и конструкционные. Одним из таких современных конструкционных решений является применение сталежелезобетонных конструкций, сочетающих в себе преимущества металлических и железобетонных конструкций. В статье представлены результаты применения нелинейного расчета на основе диаграммного метода параметров напряженно-деформированного состояния на любой стадии работы под нагрузкой, включая стадию возведения с учетом воздействий от собственного веса стальных конструкций и свежееуложенного бетона, вынужденных деформаций усадки бетона, а также прочности, деформативности сложно нагруженных сталежелезобетонных элементов здания Национальной библиотеки Республики Беларусь при условии совместной работы жестких стальных профилей и железобетона. Предложен критерий вычисления внутреннего усилия, соответствующего прочности сталежелезобетонного элемента, в виде максимального усилия, при котором выполняются условия равновесия усилий в рассматриваемом поперечном сечении, не требующий нормирования предельной сжимаемости составляющих сталежелезобетонного элемента и позволяющий учитывать высокую степень перераспределения усилий между ними в поперечном сечении.

Ключевые слова: сталежелезобетонная конструкция, нелинейная деформационная модель, диаграммы деформирования материалов, гипотеза плоских сечений, напряженно-деформированное состояние, усадка бетона, стадии работы под нагрузкой, критерий разрушения.

Введение. На современном этапе развития строительства сталежелезобетонные конструкции широко применяются при возведении каркасных зданий и сооружений с тяжело нагруженными элементами, испытывающими сложное напряженно-деформированное состояние при внецентренном сжатии-растяжении, изгибе. Преимущества сталежелезобетонных конструкций проявляются в возможности размещения в их поперечном сечении кроме стержневой (гибкой) арматуры стальных профилей (жесткой арматуры), которые имеют большую площадь поперечного сечения и контакта с бетоном, чем стержни гибкой арматуры, так же, как и в железобетоне, стальные профили защищены бетоном от воздействия коррозии и высоких температур. Кроме того, стальные профили могут быть использованы при возведении сталежелезобетонных конструкций в качестве несущих элементов и опалубки [1–6].

Совместная работа стальных элементов, имеющих большую площадь контактной поверхности с бетоном, чем гибкая арматура круглого поперечного сечения, обеспечивается устройством различных поперечных выступов в виде жестких анкерных упоров или гибких стад-болтов, арматурных стержней, присоединенных сваркой к профилям. Это позволяет исключить взаимный сдвиг профиля относительно бетона при работе под нагрузкой^{1,2} [7].

Расчет сталежелезобетонных элементов как комбинированной конструкции из профильной стали и железобетона производится по приведенному сечению в предположении упругой работы материалов метода допускаемых напряжений, аналогично стальным конструкциям. Дальнейшее развитие методов расчета и их приближение к действительной работе составляющих поперечное сечение материалов привело к применению для сталежелезобетонных элементов использование метода предельных усилий с пластической работой бетона (прямоугольная эпюра нормальных напряжений в бетоне сжатой зоны) и ограниченно пластической работой стали (стальные и железобетонные конструкции)³ [7].

¹ СП 266.1325800.2016. Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2016. – 132 с.

² ТКП 45-5.03-16-2005 (02250). Конструкции сталежелезобетонные покрытий и перекрытий. Правила проектирования. – Минск: М-во архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2006. – 71 с.

Методические рекомендации по расчету и проектированию сталежелезобетонных перекрытий. – М.: Федер. центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в стр-ве, 2018. – 62 с.

Методическое пособие по расчету и проектированию сталежелезобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М.: Федер. центр нормирования, стандартизации и оценки соответствия в стр-ве, 2018. – 49 с.

Семенов В.А. Сталежелезобетонные конструкций. Область применения и основные положения СП 266.1325800.2016 «Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования». Преимущества сталежелезобетонных конструкций по сравнению с традиционными решениями. Моделирование сталежелезобетонных конструкций с помощью современного инженерного ПО для проектировщиков // Презентация: Ассоциация развития стального строительства (АРСС). – М.: ООО «Техсофт». – 73 с.

Руководство по проектированию железобетонных конструкций с жесткой арматурой. – М.: Стройиздат, 1978. – 57 с.
EN 1994-1-1:2005. Еврокод 4. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – Ч. 1. Общие правила для зданий и сооружений. – М., 2011. – 123 с.

Руководство для проектировщиков к Еврокоду 4 EN 1994-1-1. Проектирование сталежелезобетонных конструкций. – М.: МГСУ, 2013. – 414 с.

³ См. сноски 1 и 2.

С развитием вычислительных возможностей техники стало возможным применение деформационных методов расчета к расчету поперечных сечений строительных конструкций, включая и сталежелезобетонные. Деформационный расчет позволяет получать необходимые параметры напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкций для любой формы поперечного сечения, на всех стадиях их деформирования под нагрузкой [8–14], а также учитывать фактическую нелинейность работы материалов в соответствии с их диаграммами деформирования, усадку бетона при твердении и его ползучесть при длительном нагружении [15], стадийность нагружения [16–18].

Аналогично железобетонным конструкциям, нелинейная деформационная модель (НДМ) поперечного сечения сталежелезобетонных элементов основывается на представлении поперечного сечения в виде совокупности элементарных площадок, каждая из которых работает на растяжение-сжатие в соответствии с их диаграммами деформирования, в предположении линейного распределения относительных деформаций по поперечному сечению (гипотеза плоских сечений Бернулли), что справедливо для сталежелезобетонных элементов при отсутствии сдвигов между жесткой стальной арматурой и железобетоном [8].

Одним из положительных примеров применения сталежелезобетонных элементов стало возведение уникального здания Национальной библиотеки Республики Беларусь (рисунок 1). Согласно проекту и исполнению здание Национальной библиотеки объединяет два основных объема: высотное здание книгохранилища и расположенный вокруг него 2-х – 4-х этажный стилобат, где размещаются предусмотренные библиотечной технологией вспомогательные помещения. Высота здания книгохранилища составляет 72,6 м, а высота стилобата – 17,5 м [19]. Стилобат представляет собой круглое в плане здание диаметром 167,5 м [20; 21]. Основным, наиболее интересным в конструктивном замысле является высотное книгохранилище в виде объемного «симметричного кристалла», имеющего геометрическую форму ромбокубооктаэдра с габаритными размерами 30×60×60 м. В нижней наклонной части структуры предусмотрены дополнительные стержневые элементы внешнего контура, что значительно повысило жесткость и устойчивость здания. Повышенные требования к жесткости конструктивной схемы здания книгохранилища объясняются его сплошной облицовкой декоративным стеклом.

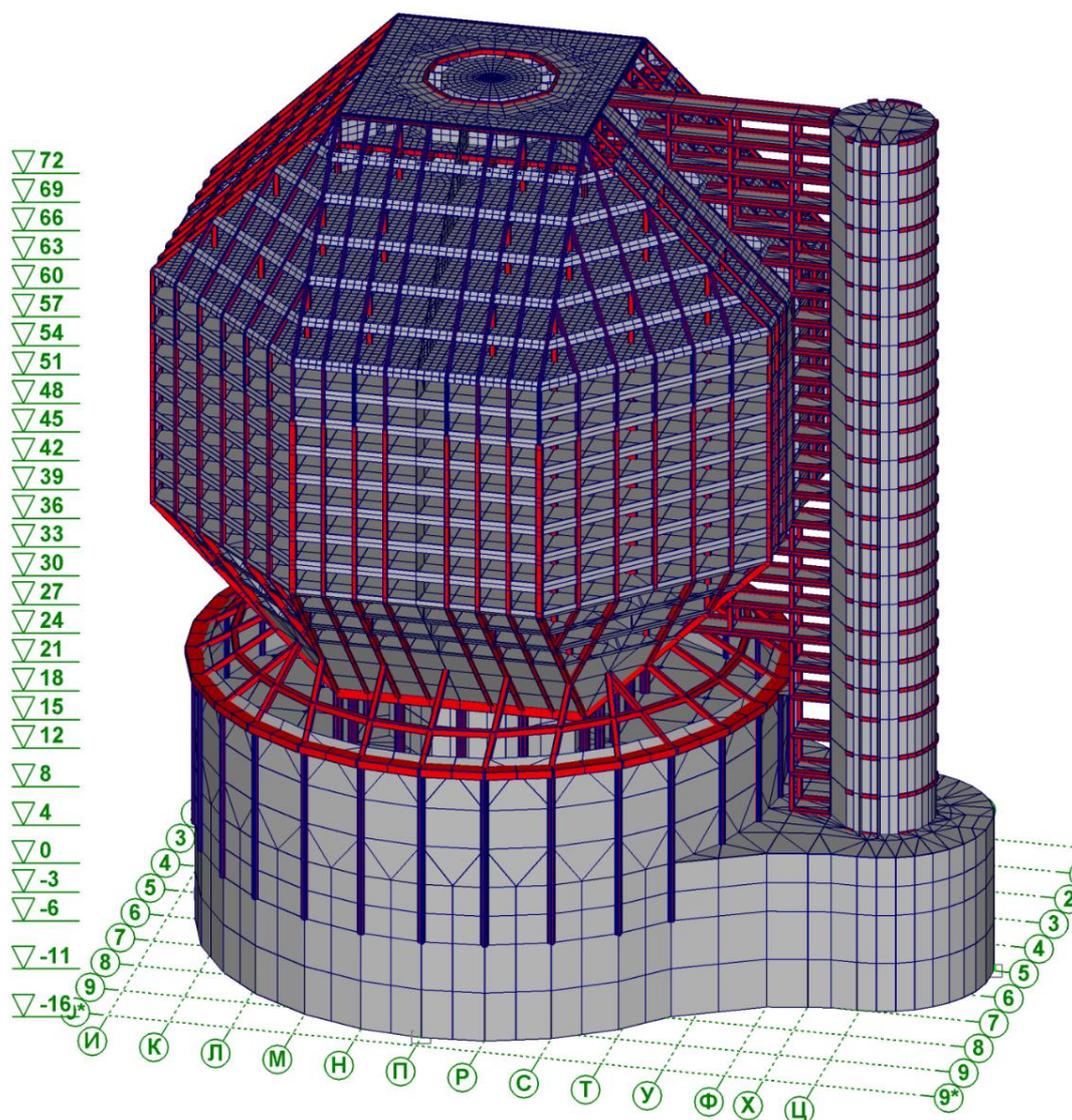


Рисунок 1. – Конструктивная схема здания Национальной библиотеки Республики Беларусь

Дополнительными стержневыми элементами, повышающими жесткость и устойчивость каркаса здания книгохранилища, являются сталежелезобетонные подкосы, опирающиеся на сталежелезобетонное опорное кольцо. Применение сталежелезобетонных элементов подкосов и опорного кольца упростило технологию бетонирования в подвесной опалубке при их отрицательном угле наклона и монтаж поддерживающих кружал.

Целью настоящего исследования является применение нелинейного подхода на основе диаграмм деформирования бетона, жесткой и гибкой арматуры с учетом стадийности нагружения стальной и железобетонной частей элемента к расчету сталежелезобетонных элементов здания книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь.

Нелинейная деформационная модель (НДМ) для сталежелезобетонных элементов. Согласно методу сечений для НДМ рассматривается поперечное сечение сталежелезобетонного элемента, состоящего из бетона, жесткой и гибкой арматуры, как совокупность элементарных площадок. Нормальные напряжения растяжения-сжатия элементарной площадки принимаются равномерно распределенными с величиной, соответствующей согласно диаграммам деформирования материалов относительным деформациям в центре ее тяжести.

Расчетная диаграмма деформирования бетона при сжатии принимается в виде параболической с ниспадающей ветвью и рекомендована Европейским комитетом по бетону (ЕКБ-ФИП)^{4,5}. Для сталежелезобетонных элементов длина нисходящей ветви не ограничивается предельными относительными деформациями бетона при сжатии с целью получения полного перераспределения усилий между составляющими поперечного сечения сталежелезобетонного элемента.

Расчетная диаграмма деформирования арматуры жесткой и гибкой арматуры при сжатии и растяжении принимается билинейной (диаграмма Прандтля) с ограничением относительных деформаций их удлинения при разрыве. Для гибкой арматуры класса S500 диаграмма деформирования имеет наклонный участок, угол наклона которого зависит от класса деформативности (пластичности) арматуры⁶.

Система уравнений НДМ в общем случае нагружения для поперечного сечения сталежелезобетонного элемента при действии продольного усилия N с эксцентриситетами ε_x и ε_y вдоль соответствующих осей относительно центра тяжести сечения элемента и изгибающих моментов M_x и M_y имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \sigma_c(\varepsilon_c(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(x_c - x_0) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(x_s - x_0) - M_x - N \cdot e_{0,x} = 0 \\ \sum \sigma_c(\varepsilon_c(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(y_c - y_0) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(y_s - y_0) - M_y - N \cdot e_{0,y} = 0 \\ \sum \sigma_c(\varepsilon_c(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c) + \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s) - N = 0 \\ \varepsilon_c(x_c, y_c) = \varepsilon_{c,II} + \varepsilon_z + \frac{1}{r_x}(x_c - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_c - y_0) \\ \varepsilon_s(x_s, y_s) = \varepsilon_{s,II} + \varepsilon_z + \frac{1}{r_x}(x_s - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_s - y_0) \end{array} \right. , \quad (1)$$

где $\sigma(x,y)$, $\varepsilon(x,y)$ – соответственно нормальные напряжения, относительные деформации в элементарной площадке составляющих поперечное сечение с координатами (x,y) ;

$A_c(x,y)$, $A_s(x,y)$ – площадь поперечного сечения элементарной площадки соответственно бетона, жесткой или гибкой арматуры с координатами (x,y) ;

(x_0, y_0) – координаты центра тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента;

$1/r_x$, $1/r_y$ – кривизна продольной оси сталежелезобетонного элемента в плоскости соответственно осей x , y ;

ε_z – относительная деформация в центре тяжести поперечного сечения сталежелезобетонного элемента, которая равна:

$$\varepsilon_z = \frac{N}{\sum E_c A_c + \sum E_s A_s}. \quad (2)$$

Влияние продольного изгиба при вычислении параметров напряженно-деформированного состояния (НДС) внецентренно сжатого сталежелезобетонного элемента на любой стадии его деформирования, включая предельную по прочности, производится коэффициентом η по формуле⁷:

⁴ СЕВ-FIB Model Code for Concrete Structures. – 2010. URL: <https://www.fib-international.org/publications/fib-bulletins/model-code-2010-first-complete-draft,-vol-1-pdf-detail.html>.

⁵ СП 5.03.01-2020. Бетонные и железобетонные конструкции. – Минск: РУП «Стройтехнорм» М-ва архитектуры и стр-ва Респ. Беларусь, 2020. – 236 с.

⁶ См. сноску 5.

⁷ См. сноски 1, 4 и 5.

$$e_0 = \left(\sqrt{e_{0,x}^2 + e_{0,y}^2} \right) \cdot \eta, \quad (3)$$

где

$$\eta = \frac{1}{1 - N/N_{crit}}; \quad (4)$$

$$N_{crit} = \frac{\pi^2 \cdot (EI)}{l_0^2}; \quad (5)$$

l_0 – расчетная длина сталежелезобетонного элемента;

(EI) – жесткость сталежелезобетонного элемента на расчетной стадии его деформирования,

$$EI = \frac{\sqrt{(N \cdot e_{0,x} + M_x)^2 + (N \cdot e_{0,y} + M_y)^2}}{\sqrt{\left(\frac{1}{r_x}\right)^2 + \left(\frac{1}{r_y}\right)^2}}. \quad (6)$$

Критерием образования трещин нормального отрыва в сталежелезобетонном элементе принимается достижение бетоном крайней по отношению к нейтральной линии элементарной площадки предельных деформаций растяжения. Внутреннее усилие от внешней нагрузки при этом соответствует усилию образования трещин. Критерием разрушения сталежелезобетонного элемента принимается максимальное значение внутреннего усилия от внешних воздействий $N (M)$, которое воспринимает элемент, и при котором выполняются условия равновесия системы уравнений (1).

В процессе возведения жесткая профильная арматура сталежелезобетонных элементов воспринимает воздействия собственного веса и веса других сборных элементов, монолитного бетона, монтажных нагрузок. Это вызывает появление исходного НДС в жесткой арматуре, отличного от нулевого. Стадийность работы под нагрузкой с учетом исходного НДС при изготовлении сталежелезобетонных элементов [16–18] в НДМ производится суммированием параметров НДС в виде относительных деформаций каждой элементарной площадки жесткой арматуры расчетного поперечного сечения с относительными деформациями $\varepsilon_{s,I}$, вычисленными на первом этапе расчета из системы уравнений (7):

$$\begin{cases} \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s)) A_s(x_s, y_s)(x_s - x_0) - M_{x,I} - N_I \cdot e_{0,x} = 0 \\ \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s)) A_s(x_s, y_s)(y_s - y_0) - M_{y,I} - N_I \cdot e_{0,y} = 0 \\ \sum \sigma_s(\varepsilon_s(x_s, y_s)) A_s(x_s, y_s) - N_I = 0 \\ \varepsilon_{s,I}(x_s, y_s) = \varepsilon_{z,I} + \frac{1}{r_{x,I}}(x_s - x_0) + \frac{1}{r_{y,I}}(y_s - y_0) \end{cases}. \quad (7)$$

Кроме того, при бетонировании сталежелезобетонных конструкций и твердении бетона на портландцементе на строительной площадке проявляются усадочные деформации, которые сдерживаются стальными профилями с большой контактной поверхностью и гибкой арматурой. Учитывая высокую степень армирования сталежелезобетонных элементов, возникает возможность появления усадочных трещин. При действии вынужденных усадочных относительных деформаций сжатия в бетоне в жесткой и гибкой арматуре появляются относительные деформации сжатия, а в бетоне – вследствие сопротивления жесткой и гибкой арматуры относительные деформации растяжения.

На второй стадии расчета при действии вынужденных относительных деформаций усадки бетона при его твердении поперечное сечение сталежелезобетонного элемента представляется без увеличения внешней нагрузки. Относительную деформацию полной усадки бетона $\varepsilon_{cs}(t, t_s)$ в момент времени t , имеющего возраст t_s к моменту начала воздушно-сухого хранения, вычисляют по формуле⁸:

$$\varepsilon_{cs}(t, t_s) = \varepsilon_{cbs}(t) + \varepsilon_{cds}(t, t_s), \quad (8)$$

где $\varepsilon_{cbs}(t)$ – относительная деформация базовой усадки бетона;
 $\varepsilon_{cds}(t, t_s)$ – относительная деформация усадки высыхания бетона.

⁸ См. сноску 5.

Система уравнений для расчета параметров НДС сталежелезобетонного элемента на второй стадии расчета преобразуется к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum \sigma_{c,II}(\varepsilon_{c,II}(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(x_c - x_0) + \sum \sigma_{s,II}(\varepsilon_{s,II}(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(x_s - x_0) - M_{x,I} - N_I \cdot e_{0,x} = 0 \\ \sum \sigma_{c,II}(\varepsilon_{c,II}(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c)(y_c - y_0) + \sum \sigma_{s,II}(\varepsilon_{s,II}(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s)(y_s - y_0) - M_{y,I} - N_I \cdot e_{0,y} = 0 \\ \sum \sigma_{c,II}(\varepsilon_{c,II}(x_c, y_c))A_c(x_c, y_c) + \sum \sigma_{s,II}(\varepsilon_{s,II}(x_s, y_s))A_s(x_s, y_s) - N_I = 0 \\ \varepsilon_{c,II}(x_c, y_c) = \varepsilon_{z,I} + \frac{1}{r_x}(x_c - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_c - y_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \\ \varepsilon_{s,II}(x_s, y_s) = \varepsilon_{s,I} + \frac{1}{r_x}(x_s - x_0) + \frac{1}{r_y}(y_s - y_0) + \varepsilon_{cs}(t, t_s) \end{array} \right. \quad (9)$$

Полученные на второй стадии расчета параметры НДС сталежелезобетонного элемента будут являться исходными на последующих стадиях его работы под нагрузкой (система уравнений (1)).

Расчет сталежелезобетонных элементов по НДМ. Сталежелезобетонными элементами здания книгохранилища Национальной библиотеки Республики Беларусь являются: опорное кольцо ОК радиусом 27650 мм; наклонные элементы НЭ1...НЭ3, поддерживающие, консольно выступающие, окаймляющие железобетонные балки перекрытий, общей длиной 25400 мм и расчетной (с учетом раскрепления по длине балками перекрытий) – $l_0 = 4240$ мм; подкосы ПК, опирающиеся одним концом на опорное кольцо, другим – на наклонные элементы в месте их соединения с окаймляющими балками перекрытий на отметке 18 600 м, длиной 12 100 мм ($l_0 = 6050$ мм) (рисунок 2). Сталежелезобетонный элемент опорного кольца под действием монтажных усилий, собственного веса и внутренних усилий от действующих нагрузок испытывает растяжение (+) с изгибом, остальные сталежелезобетонные элементы – сжатие (–) с изгибом. Расчетные усилия в рассматриваемых сталежелезобетонных элементах в момент времени их бетонирования (N_I, M_I) и от расчетных эксплуатационных нагрузок (N, M) приведены в таблице 1.

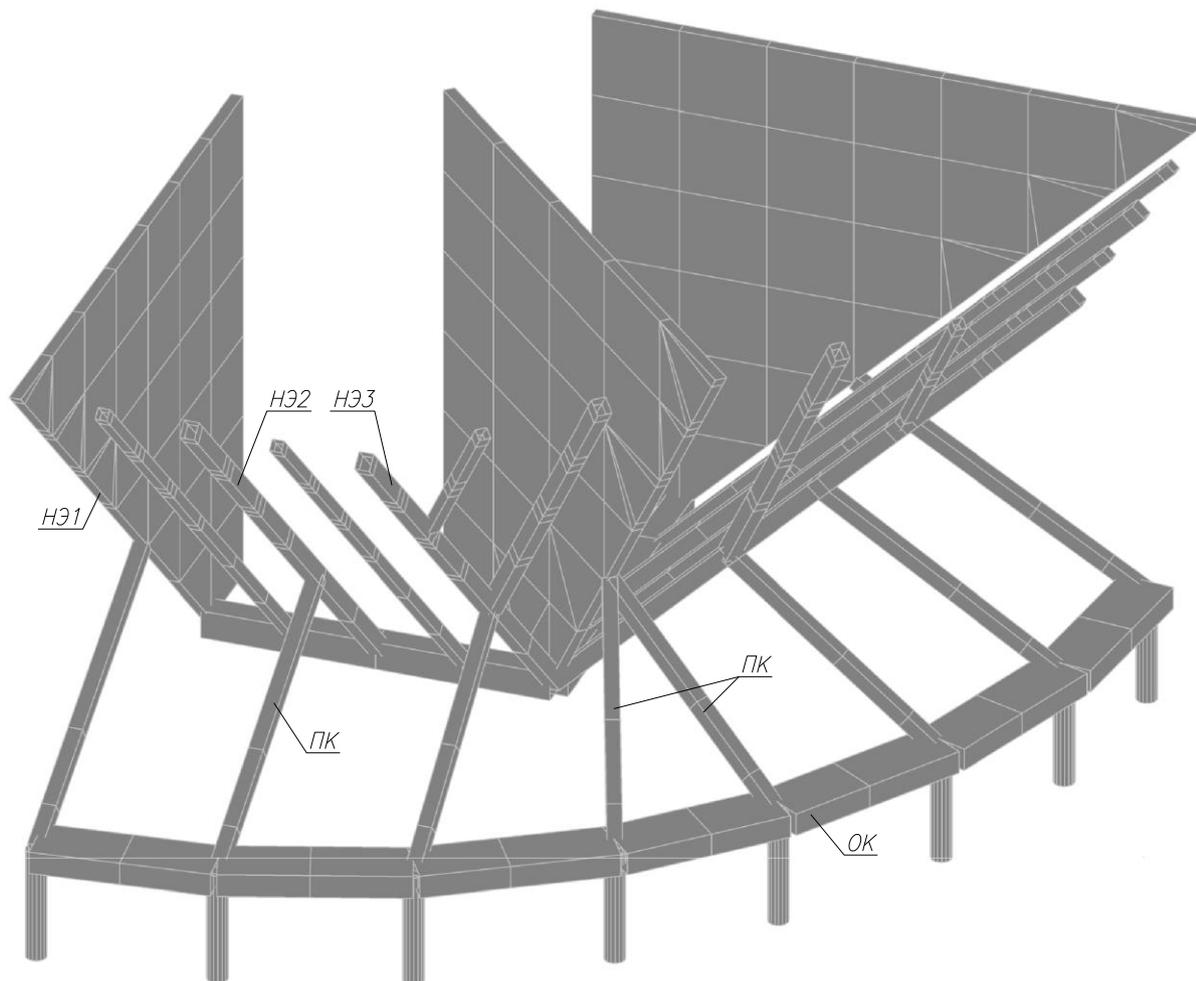
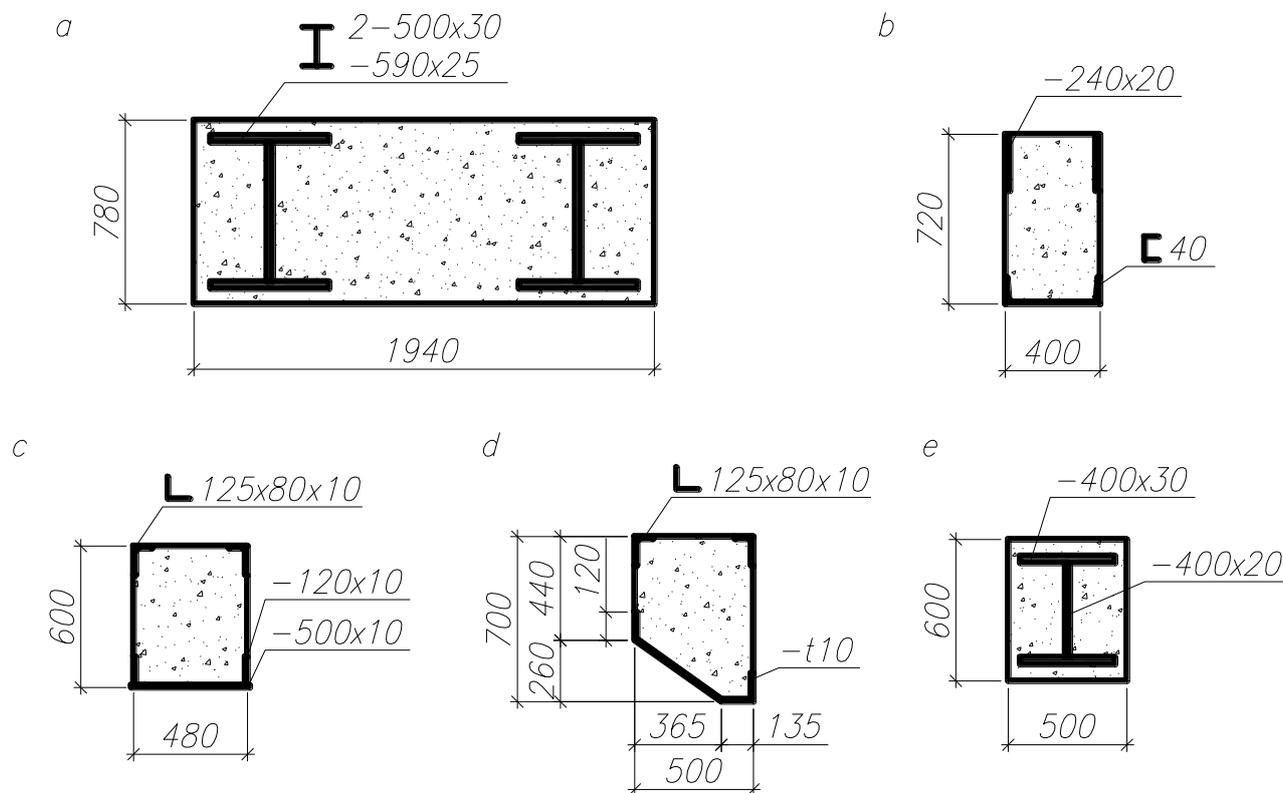


Рисунок 2. – Сталежелезобетонные элементы здания книгохранилища

Таблица 1. – Расчетные усилия в сталежелезобетонных элементах

Шифр элемента	N_i , кН	M_i , кН·м	η_i	N , кН	M , кН·м	η	N_u , кН	M_u , кН·м	η_u
ОК	+4250	168	–	+5285	280	–	+26823	1393	–
НЭ1	–43	26	1,000	–220	150	1,001	–2152	1498	1,027
НЭ2			1,000			1,001	–1743	1208	1,026
НЭ3			1,001			1,001	–1777	1226	1,018
ПК	–1364	18	1,000	–3560	21	1,001	–13587	461	2,679

Поперечные сечения рассматриваемых сталежелезобетонных элементов с жесткой арматурой из прокатных и сварных профилей приведены на рисунке 3. Все стальные профили сталежелезобетонных элементов выполнены из стали С345, за исключением наклонных элементов НЭ1...НЭ3, которые изготовлены из стали С245. Бетон на бездобавочном портландцементе принят класса С25/30.



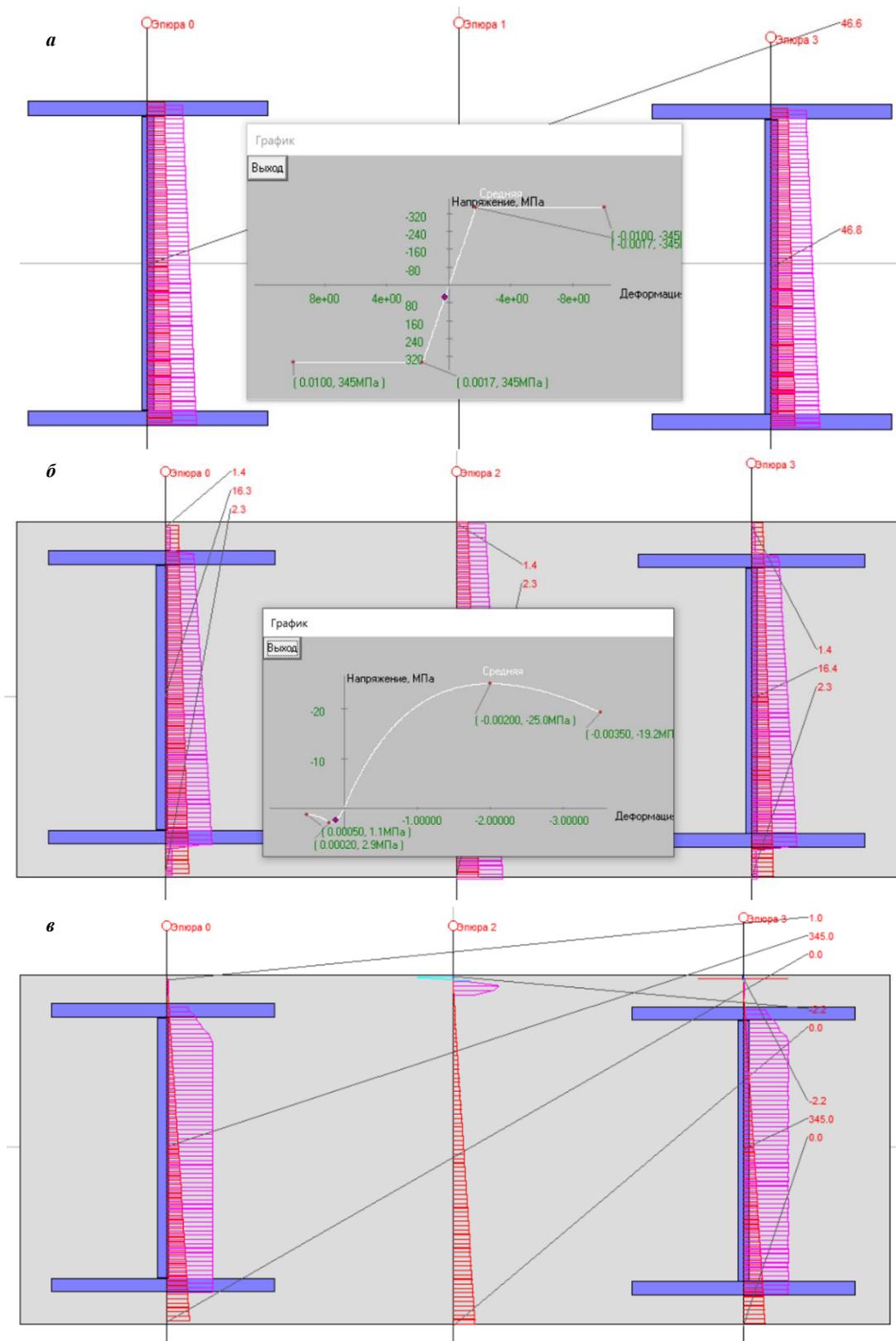
a – опорное кольцо ОК; *b* – наклонный элемент НЭ1; *c* – наклонный элемент НЭ2; *d* – наклонный элемент НЭ3; *e* – подкосы ПК

Рисунок 3. – Поперечные сечения сталежелезобетонных элементов с жесткой арматурой из прокатных и сварных профилей

Пример вычисления параметров напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонного элемента по предлагаемой методике для растянуто изгибаемого опорного кольца при действии усилий от внешних воздействий при бетонировании, а также при расчетных и предельных внутренних усилиях показан на рисунке 4.

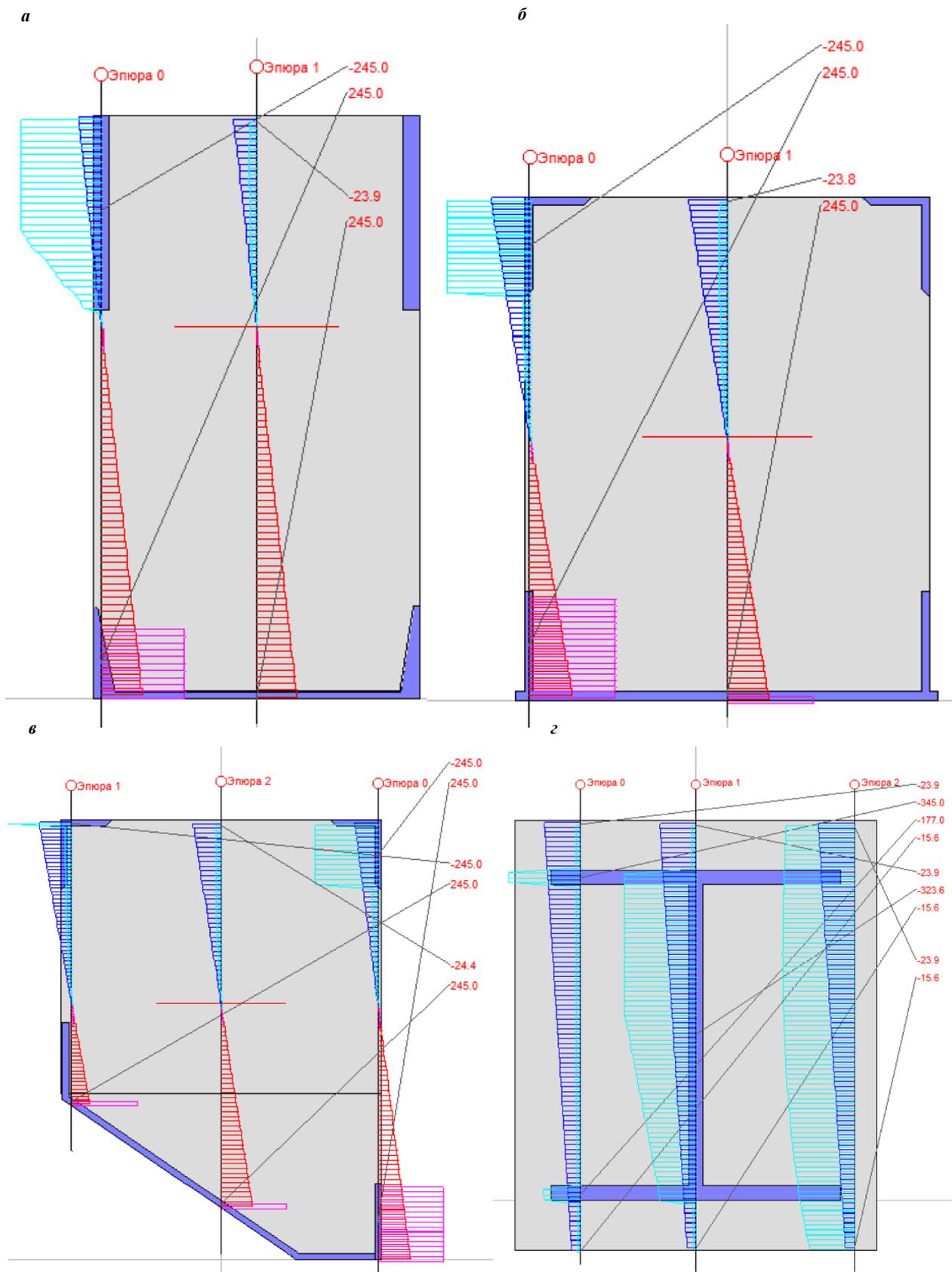
Результаты расчета показывают, что вынужденные деформации усадки бетона $\varepsilon_{cs}(t, t_s) = 0,00025$ вызывают появление в бетоне растягивающих напряжений, а в жесткой профильной арматуре – сжимающих, частично гасящих растягивающие напряжения от внешних воздействий. При действии эксплуатационных нагрузок в бетоне опорного кольца отсутствуют трещины нормального отрыва. В предельном по прочности состоянии при растяжении с изгибом в опорном кольце усилия от внешних воздействий воспринимает только стальная арматура.

Распределение параметров НДС по высоте поперечного сечения внецентренно сжатых сталежелезобетонных элементов с учетом их продольного изгиба, начального напряженно-деформированного состояния в момент времени бетонирования и вынужденных деформаций усадки твердеющего бетона на портландцементе в предельном по прочности состоянии приведено на рисунке 5. Результаты вычисления предельных усилий (N_u , M_u) рассматриваемых сталежелезобетонных элементов приведены в таблице 1.



а – при действии растягивающего продольного усилия $N_I = 4251$ кН и изгибающего момента $M_{SdI} = 168$ кН·м перед бетонированием; **б** – то же, при тех же внутренних усилиях и вынужденных деформаций усадки бетона после его твердения; **в** – при действии предельного растягивающего продольного усилия $N_u = 26823$ кН и изгибающего момента $M_u = 1393$ кН·м (цифры красным цветом справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

Рисунок 4. – Распределение нормальных напряжений и относительных деформаций и по поперечному сечению сталежелезобетонного элемента опорного кольца ОК



a – НЭ1; б – НЭ2; в – НЭ3; г – ПК при действии предельных по прочности внутренних усилий (цифры красным цветом справа от поперечного сечения – нормальные напряжения в МПа)

Рисунок 5. – Распределение относительных деформаций и нормальных напряжений по поперечному сечению сжатой изгибаемых сталежелезобетонных элементов

Расчет предельных значений внутренних усилий сталежелезобетонных элементов Национальной библиотеки Республики Беларусь показывает существенный запас прочности при учете в работе бетона при сжатии.

Заключение. На примере сжатых (растянутых) с изгибом сталежелезобетонных элементов Национальной библиотеки Республики Беларусь продемонстрирована применимость нелинейной деформационной модели для вычисления их параметров НДС на стадии их возведения с учетом действующих усилий и вынужденных деформаций усадки бетона при бетонировании, при работе под нагрузкой, включая предельную.

Учет усадки бетона позволяет повысить надежность расчета параметров НДС сталежелезобетонных элементов, предусмотреть возможность появления усадочных трещин на стадии их бетонирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А.П. Железобетон с жесткой арматурой / Нар. ком. по стр.-ву. Техн. упр. Центр. науч.-исслед. ин-та пром. сооружений (ЦНИПС). – М.; Л.: Гос. изд. строит. лит., 1941. – 123 с.
2. Расчет сталежелезобетонной колонны высотного дома на косое внецентренное сжатие / А.М. Десяткин, Д.В. Конин, А.С. Мартиросян и др. // Жилищ. стр.-во. – 2015. – № 5. – С. 92–95.
3. Тамразян А.Г., Лолейт А.Ф. История развития теории железобетона: биографический очерк. – М.: МГСУ, 2018. – 184 с.
4. Бабалич В.С., Андросов Е.Н. Сталежелезобетонные конструкции и перспектива их применения в строительной практике России // Успехи современ. науки. – 2017. – Т. 4, № 4. – С. 205–208.
5. Кибирева Ю.А., Астафьева Н.С. Применение конструкций из сталежелезобетона // Экология и стр.-во. – 2018. – № 2. – С. 27–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2018-02-004.
6. Виноградова Н.А., Швец Г.А. Исследования сталежелезобетонных изгибаемых конструкций (обзор) // Вестн. инженер. шк. ДВФУ. – 2020. – № 1(42). – С. 114–127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12.
7. Тонких Г.П., Чесноков Д.А. Экспериментальное исследование сдвигового соединения монолитных сталежелезобетонных перекрытий на угловых анкерных упорах // Вестн. МГСУ. – 2021. – № 2. – С. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152.
8. Мухамедиев Т.А., Старчикова О.И. Расчет прочности сталежелезобетонных колонн с использованием деформационной модели // Бетон и железобетон. – 2006. – № 4(541). – С. 18–20.
9. Карпенко Н.И., Соколов Б.С., Радайкин О.В. К расчету прочности, жесткости и трещиностойкости внецентренно сжатых железобетонных элементов с применением нелинейной деформационной модели // Изв. Казан. гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2013. – № 4(26). – С. 113–120.
10. Кудинов О.В. Новый подход к оценке прочности сталежелезобетонных перекрытий // Бетон и железобетон. – 2010. – № 2(563). – С. 14–16.
11. Арленинов П.Д., Крылов С.Б. Современное состояние нелинейных расчетов железобетонных конструкций // Сейсмостойкое стр.-во. Безопасность сооружений. – 2017. – № 3. – С. 50–53.
12. Gholamhoseini A., Gilbert R.L., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking // *ACI Structural Journal*. – 2018. – Vol. 115, № 2. – P. 439–449. DOI: 10.14359/51701133.
13. Карпенко Н.И., Мухамедиев Т.А., Петров А.Н. Исходные и трансформированные диаграммы деформирования бетона и арматуры // Напряженно-деформированное состояние бетонных и железобетонных конструкций: сб. науч. тр. / под ред. С.М. Крылова, Т.А. Мухамедиева. – М.: НИИЖБ Госстроя СССР, 1986. – С. 7–25.
14. Бондаренко В.М., Бондаренко С.В. Инженерные методы нелинейной теории железобетона. – М.: Стройиздат, 1982. – 287 с.
15. Учет ползучести и усадки бетона по СП 5.03.01-2020 при расчете железобетонных конструкций на основе деформационной расчетной модели / Д.Н. Лазовский, В.В. Тур, Д.О. Глухов и др. // Вестн. гос. техн. ун-та. Сер. Техн. науки (стр.-во, машиностроение, геоэкология). Экон. науки. – 2021. – № 2(125). – С. 7–12.
16. Лазовский Д.Н. Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых строительных сооружений. – Новополоцк: Полоц. гос. ун-т, 1998. – 240 с.
17. Нелинейный расчет изгибаемых сталежелезобетонных элементов / Д.Н. Лазовский, Д.О. Глухов, А.М. Хаткевич и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф. Стр.-во. Приклад. науки. – 2024. – № 2(37). – С. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
18. Лазовский Д.Н., Гиль А.И., Глухов Д.О. Деформационный подход к расчету сопротивления сжатию сталежелезобетонных элементов // Вестн. МГСУ. – 2024. – Т. 19, вып. 9. – С. 1469–1483. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/45682>.
19. Архитектурно-конструктивные решения уникального здания Национальной библиотеки Беларуси / М.К. Виноградов, В.В. Крамаренко, Л.М. Шохина и др. // Строит. наука и техника. – 2005. – № 1. – С. 8–13.
20. Шохина Л.М. Конструктивные решения нового здания библиотеки // Архитектура и строительство. – 2003. – № 2. – С. 2–3.
21. Конструктивные решения высотного здания книгохранилища Национальной библиотеки Беларуси / Д.Н. Лазовский, А.В. Поправко, Т.М. Пецольд и др. // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В, Пром.-сть. Приклад. науки. – 2006. – № 9. – С. 2–7.

REFERENCES

1. Vasiliev A.P. *Reinforced concrete with rigid reinforcement* / People's Committee for Construction. Tech. Manage. Central Research Institute of Industrial Structures (TsNIPS). – Moscow; Leningrad: State Publishing House of Construction Literature, 1941. – 123 p.
2. Desyatkin M.A. Calculation of a steel-reinforced concrete column of a high-rise building for oblique eccentric compression / A.M. Desyatkin, D.V. Konin, A.S. Martirosyan, V.I. Travush // *Housing construction*. – 2015. – № 5. – P. 92–95.
3. Tamrazyan A.G., Loley A.F. *History of the development of the theory of reinforced concrete: a biographical essay*. – Moscow: MGSU, 2018. – 184 p.
4. Babalich V.S., Androsov E.N. Composite reinforced concrete structures and the prospects of their application in the construction practice of Russia // *Advances in modern science*. – 2017. – Vol. 4, № 4. – P. 205–208.
5. Kibireva Yu.A., Astafieva N.S. Application of composite structures // *Ecology and Construction*. – 2018. – № 2. – P. 27–34. DOI: 10.35688/2413-8452-2018-02-004.

6. Vinogradova N.A., Shvets G.A. Research of composite reinforced concrete bending structures (review) // *Bulletin of the FEFU Engineering School*. – 2020. – № 1(42). – P. 114–127. DOI: 10.24866/2227-6858/2020-1-12.
7. Tonkikh G.P., Chesnokov D.A. Experimental study of the shear connection of monolithic composite floors on corner anchor supports // *Bulletin of MGSU*. – 2021. – № 2. – P. 144–152. DOI: 10.22227/1997-0935.2021.2.144-152.
8. Mukhamediyev T.A., Starchikova O.I. Calculation of composite columns strength using deformation model // *Concrete and reinforced concrete*. – 2006. – № 4(541). – P. 18–20.
9. Karpenko N.I. On calculation of strength, rigidity and crack resistance of eccentrically compressed reinforced concrete elements using nonlinear deformation model / N.I. Karpenko, B.S. Sokolov, O.V. Radaykin // *Bulletin of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*. – 2013. – № 4(26). – P. 113–120.
10. Kudinov O.V. New approach to assessment of composite floors strength // *Concrete and reinforced concrete*. – 2010. – № 2(563). – P. 14–16.
11. Arleninov P.D., Krylov S.B. Current state of nonlinear calculations of reinforced concrete structures // *Earthquake engineering. Safety of structures*. – 2017. – № 3. – P. 50–53.
12. Gholamhoseini A., Gilbert R.I., Bradford M. Long-Term Behavior of Continuous Composite Concrete Slabs with Steel Decking // *ACI Structural Journal*. – 2018. – Vol. 115, № 2. – P. 439–449. DOI: 10.14359/51701133.
13. Karpenko N.I., Mukhamediyev T.A., Petrov A.N. Initial and transformed diagrams of deformation of concrete and reinforcement // *Coll. Stress-strain state of concrete and reinforced concrete structures*. – M.: NIIZHB, 1986. – P. 7–25.
14. Bondarenko V.M., Bondarenko S.V. *Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete*. – M.: Stroyizdat, 1982. – 287 p.
15. Lazovsky D.N. Accounting for creep and shrinkage of concrete according to SP 5.03.01-2020 in the calculation of reinforced concrete structures based on the deformation calculation model / D.N. Lazovsky, V.V. Tur, D.O. Glukhov, E.D. Lazovsky // *Bulletin of the Brest State Technical University. Series Technical sciences (construction, mechanical engineering, geocology). Economic sciences*. – 2021. – № 2(125). – P. 7–12.
16. Lazovsky D.N. *Strengthening of reinforced concrete structures of operated building structures* / D.N. Lazovsky. – Novopolotsk: Polotsk State University, 1998. – 240 p.
17. Nonlinear calculation of bending steel-reinforced concrete elements / D.N. Lazovsky, D.O. Glukhov, A.M. Khatkevich [et al.] // *Bulletin of Polotsk State University. Series F, Construction. Applied Sciences*. – 2024. – № 2(37). – P. 9–23. DOI: 10.52928/2070-1683-2024-37-2-9-23.
18. Lazovsky D.N., Gil A.I., Glukhov D.O. Deformation approach to calculating the compressive strength of composite steel elements // *Bulletin of MGSU*. – 2024. – Vol. 19, Issue 9. – P. 1469–1483. URL: <https://elib.psu.by/handle/123456789/45682>.
19. Architectural and structural solutions for the unique building of the National Library of Belarus / M.K. Vinogradov, V.V. Kramarenko, L.M. Shokhina, T.M. Petzold, D.N. Lazovsky, V.A. Potersshchuk // *Construction Science and Technology*. – 2005. – № 1. – P. 8–13.
20. Shokhina L.M. Structural solutions for the new library building // *Architecture and Construction*. – 2003. – № 2. – P. 2–3.
21. Structural solutions for the high-rise building of the book depository of the National Library of Belarus / D.N. Lazovsky, A.V. Popravko, T.M. Petzold, L.M. Shokhina // *Bulletin of Polotsk State University. Series B, Applied Sciences*. – 2006. – № 9. – P. 2–7.

Поступила 28.03.2025

STRENGTH ASSESSMENT OF STEEL-REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF THE BOOK DEPOSIT OF THE NATIONAL LIBRARY OF THE REPUBLIC OF BELARUS

D. LAZOUSKI¹⁾, L. SHOKHINA²⁾, A. POPRAVKO³⁾, T. GLUKHOVA⁴⁾
^(1), 4) *Euphrosyne Polotskaya State University of Polotsk*, ²⁾ *OJSC «Minskproekt»*,
³⁾ *Project Institute for Reconstruction and Construction, Novopolotsk*

The unique building of the National Library of the Republic of Belarus includes not only urban planning, architectural, technological modern solutions, but also structural ones. One of such modern structural solutions is the use of steel-reinforced concrete structures that combine the advantages of metal and reinforced concrete structures. The article presents the results of applying a nonlinear calculation based on the diagrammatic method of stress-strain state parameters at any stage of work under load, including the construction stage, paying attention to the effects of the dead weight of steel structures and freshly laid concrete, accounting for forced deformations of concrete shrinkage, as well as the strength, deformability of complexly loaded steel-reinforced concrete elements of the building of the National Library of the Republic of Belarus, subject to the joint operation of rigid steel sections and reinforced concrete. A criterion for calculating the internal force corresponding to the strength of a composite element is proposed in the form of the maximum force at which the conditions of force equilibrium in the cross-section under consideration are met, which does not require standardization of the ultimate compressibility of the composite element components and allows taking into account the high degree of force redistribution between them in the cross-section.

Keywords: *composite structure, nonlinear deformation model, material deformation diagrams, plane section hypothesis, stress-strain state, concrete shrinkage, stages of work under load, failure criterion.*