Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева
Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 3 (57). С. 91–99

Ю. В. Немировский[1,2], *С. В. Тихонов*[3]

ПРЕДЕЛЬНО-УПРУГИЙ ИЗГИБ N-СЛОЙНОГО ФИЗИЧЕСКИ-НЕЛИНЕЙНОГО БЕТОННОГО СТЕРЖНЯ

[1] *Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия*

[2] *Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия*

[3] *Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия*

Аннотация. В данной работе рассматривается задача изгиба многослойного стержня поперечными нагрузками при наличии зон упругого и нелинейно-неупругого деформирования, получены соотношения для определения границы раздела упругой и нелинейно-неупругой областей деформирования стержня. Получены численные расчеты для случаев совпадения и несовпадения нейтральной линии с осью стержня. Приведены численные расчеты предельных нагрузок: первой (деформация достигает значения предельной неупругой) и второй (деформация достигает значения деформации предразрушения).

Ключевые слова: бетонные стержни, аналитические решения, физическая нелинейность, упругость, поперечные нагрузки, нейтральная линия

DOI: 10.37972/chgpu.2023.57.3.008

УДК: 539.374

Рассмотрим n-слойный бетонный стержень поперечного сечения ($n \geq 2$), симметричный относительно осей координат (рис. 1), где через h_i обозначена высота i-го слоя, причем будем считать $h_0 = 0$. Через $b_i(z)$ обозначим функцию, описывающую толщину i-го слоя. Начало координат поместим в центр поперечного сечения стержня, ось Ox направим вдоль оси стержня, ось Oz вертикально вверх. На рисунке 1 цифрами $1, 2, ..., i, ..., n$ обозначены номера соответствующих слоев.

Немировский Юрий Владимирович
`e-mail:` nemiryury@mail.ru, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН, г. Новосибирск, Россия, профессор, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия.
Тихонов Сергей Владимирович
`e-mail:` strangcheb@mail.ru, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерных технологий, Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Поступила 15.09.2023

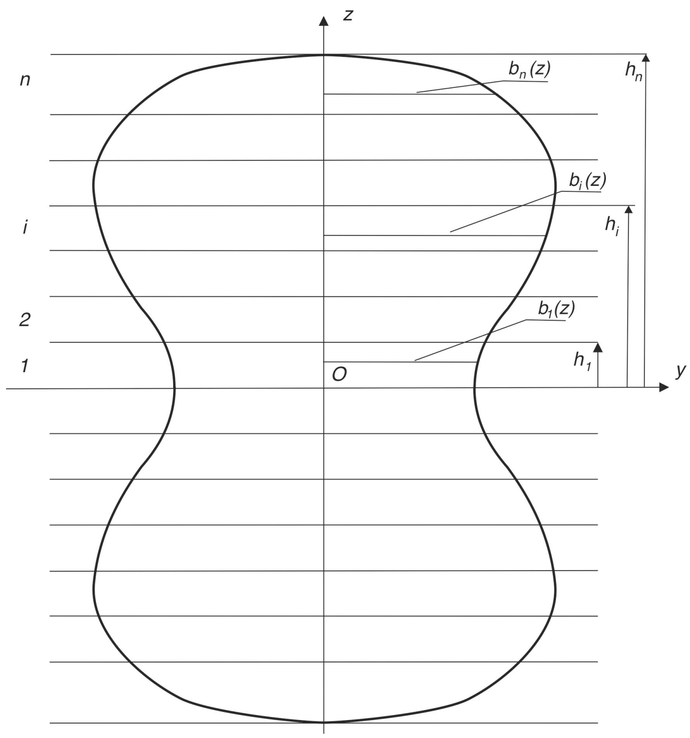

Рис. 1. Поперечное сечение n-слойного бетонного стержня

Примем, что имеет место упругое деформирование при деформациях, не превышающих значений предельных упругих [1–5] $0 \leq \varepsilon < \varepsilon_{0i}^{+}$

$$\sigma_i^e = E_i \varepsilon, \tag{1}$$

а при превышающих значениях $\varepsilon_{0i}^{+} \leq \varepsilon < \varepsilon_{*i}^{+}$ имеет место нелинейное квази-упругое деформирование бетонного стержня, определяемое соотношениями

$$\sigma_i^n = A_{1i}\varepsilon + A_{2i}\varepsilon^2. \tag{2}$$

Перейдем к безразмерным величинам, используя соотношения

$$\tilde{\sigma} = \frac{\sigma}{\sigma_{1*}^{-}}, \quad \tilde{l} = 1, \quad \tilde{b}_i = \frac{b_i}{l}, \quad \tilde{h}_i = \frac{h_i}{l}, \tag{3}$$

$$\tilde{q} = q\frac{1}{l\sigma_{1*}^{-}}, \quad \tilde{Q} = Q\frac{1}{l^2\sigma_{1*}^{-}}, \quad \tilde{N} = N\frac{1}{l^2\sigma_{1*}^{-}}, \quad \tilde{M} = M\frac{1}{l\sigma_{1*}^{-}}, \quad \tilde{w} = \frac{w}{l},$$

где обезразмеривающие величины такие: σ_{1*}^{-} – предел прочности при сжатии бетона марки $B10$, l – длина стержня, q – величина распределенной нагрузки, Q – величина перерезывающей силы, M – величина изгибающего момента, N – продольного усилия, w – величина прогиба стержня.

Предельные упругие деформации и деформации предразрушения бетона существенно меньше при растяжении, чем при сжатии. Если нагрузки на стержень направлены вертикально вниз и стержень шарнирно оперт (рис. 2), то верхняя часть

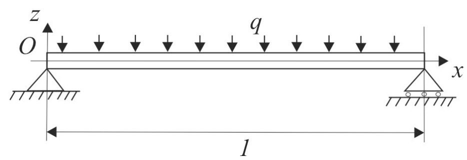

Рис. 2. Шарнирно-опертый стержень под действием равномерно-распределенной нагрузки

стержня будет находиться в области сжатия, а нижняя – в области растяжения. Из-за наличия разносопротивляемости бетона растяжению и сжатию, даже при наличии симметрии поперечного сечения, нейтральная линия не совпадает с осью стержня. Очевидно, что для положения нейтральной линии в данном поперечном сечении справедливо $z_0(x) > 0$. В общем случае нейтральная линия в зависимости от положения поперечного сечения может переходить из одного слоя в другой вдоль оси стержня.

В зависимости от физических параметров стержня и нагрузок в стержне возможны области упругого деформирования, нелинейного квазиупругого деформирования и области, где проходит граница раздела упругого и нелинейного квазиупругого деформирования. Введем следующие обозначения:

- A_e – индексы слоев, соответствующих линейному упругому деформированию;
- A_n – индексы слоев, соответствующих нелинейному квазиупругому деформированию;
- A_z – индексы слоев, где проходит граница раздела упругого и нелинейного квазиупругого деформирования,

причем множества A_e, A_n, A_z должны удовлетворять соотношению

$$A_e \cup A_n \cup A_z = \{1, 2, 3, ..., n\}.$$

Положим, что имеет место одноосное напряженное состояние и справедливы классические кинематические гипотезы Кирхгофа-Лява, тогда величины изгибающего момента M_y и продольного усилия N будут равны

$$M_y(x) = -2 \sum_{i \in A_e} \int_{-h_i}^{-h_{i-1}} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^e z dy - 2 \sum_{i \in A_n} \int_{-h_i}^{-h_{i-1}} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^n z dy - \tag{4}$$

$$-2 \sum_{i \in A_z} \left(\int_{-h_i}^{z_i} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^n z dy + \int_{z_i}^{-h_{i-1}} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^e z dy \right) - 2 \sum_{i=1}^{n} \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^e z dy,$$

$$N(x) = -2 \sum_{i \in A_e} \int_{-h_i}^{-h_{i-1}} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^e dy - 2 \sum_{i \in A_n} \int_{-h_i}^{-h_{i-1}} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^n dy - \tag{5}$$

$$-2 \sum_{i \in A_z} \left(\int_{-h_i}^{z_i} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^n dy + \int_{z_i}^{-h_{i-1}} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^e dy \right) - 2 \sum_{i=1}^{n} \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz \int_0^{b_i} \sigma_i^e dy.$$

Граница раздела упругого деформирования и нелинейного квазиупругого деформирования $z_i(x)$ для всех индексов i из A_z должна удовлетворять соотношениям

$$-h_i \leq z_1(x) \leq -h_{i-1}. \tag{6}$$

Для деформации справедливы соотношения

$$\varepsilon(x,z) = z_0(x)\frac{d^2w_0(x)}{dx^2} - z\frac{d^2w_0(x)}{dx^2}, \tag{7}$$

где $w_0(x)$ – величина прогиба осевой линии стержня.

Задача, изображенная на рис. 2, является статически определимой, тогда значения изгибающих моментов и продольных усилий имеют вид

$$M_y(x) = q\left(\frac{x^2}{2} - \frac{x}{2}\right), \quad N(x) = 0. \tag{8}$$

На границе раздела областей упругого и нелинейного квазиупругого деформирования $z = z_i(x)$ деформация будет равна предельной упругой деформации для i-го слоя ε_{0i}^{+}

$$\varepsilon_{0i}^{+} = \frac{d^2w_0(x)}{dx^2} - z_i(x)\frac{d^2w_0(x)}{dx^2},$$

откуда можно получить выражение для второй производной прогиба

$$\frac{d^2w_0(x)}{dx^2} = \frac{\varepsilon_{0i}^{+}}{1 - z_i(x)}. \tag{9}$$

Если множество A_z состоит из k индексов, т.е. $A_z = \{j_1, j_2, ..., j_k\}$, тогда равенство (9) будет справедливо для всех элементов из A_z, т.е. имеем

$$\frac{\varepsilon_{0j_1}^{+}}{1 - z_{j_1}(x)} = \frac{\varepsilon_{0j_2}^{+}}{1 - z_{j_2}(x)} = ... = \frac{\varepsilon_{0j_k}^{+}}{1 - z_{j_k}(x)}. \tag{10}$$

Из уравнений (5)-(8), (10) при известных множествах A_e, A_n, A_z можно определить неизвестные z_0, z_{j_1}, z_{j_2}, ..., z_{j_k}, которые полностью определят распределение усилий и деформаций в стержне.

Для удобства возможную конфигурацию A_e, A_n, A_z будем обозначать в виде вектора $(i_1, i_2, ..., i_n)$, где для каждого номера слоя $j = 1, ..., n$ компонент вектора i_j может принимать значения 0, 1, 2, соответствующие слою с упругим деформированием, нелинейным квазиупругим и слою, где проходит граница раздела упругого и нелинейного квазиупругого деформирования. Из вектора $(i_1, i_2, ..., i_n)$ легко получить множества A_e, A_n, A_z. Для заданного количества слоев n количество возможных векторов $(i_1, i_2, ..., i_n)$ будет равно 3^n.

Можно существенно сузить область поиска конфигураций $(i_1, i_2, ..., i_n)$, которые возможны при заданных физических параметрах стержня и нагрузке q, определив нижнюю и верхнюю границы нагрузок q_{min} и q_{max} соответственно.

В данной постановке задачи мы учитываем только деформирование на участке $0 \le \varepsilon < \varepsilon_{*i}$, что соответствует восходящей ветви диаграммы растяжения бетона. Соответственно, функция $\sigma(\varepsilon)$, описывающая эту диаграмму, будет, исходя из вида диаграммы, монотонно возрастающей.

Рассмотрим j-й слой стержня, в котором находится граница раздела областей упругого и нелинейного деформирования. Тогда для данного слоя справедливо, согласно уравнению (7), неравенство

$$\varepsilon(x, -h_{j-1}) < \varepsilon(x, z_j) < \varepsilon(x, -h_j). \tag{11}$$

Из условия монотонного возрастания функции $\sigma(\varepsilon)$ и (11) следует

$$\sigma(\varepsilon(x,-h_{j-1})) < \sigma(\varepsilon(x,z_j)) < \sigma(\varepsilon(x,-h_j)). \tag{12}$$

Из соотношений для изгибающего момента (5) и (12) следует, что наибольшее по модулю значение момента будет достигаться на верхней границе слоя. Тогда из (8) будет справедливо

$$|q(x,-h_{j-1})| < |q(x,z_j)| < |q(x,-h_j)|. \tag{13}$$

Для каждого i-го слоя в области упругого деформирования деформация находится в интервале $0 \le \varepsilon < \varepsilon_{0i}^{+}$, а для области нелинейного квазиупруго деформирования в интервале $\varepsilon_{0i}^{+} \le \varepsilon < \varepsilon_{*i}^{+}$.

Для заданного набора $(i_1, i_2, ..., i_n)$ в данном сечении x определим нижнюю границу нагрузки q_{min} как максимальное значение из минимальных нагрузок для каждого слоя

$$q_{min} = \min\{q_{min,1}, q_{min,2}, ..., q_{min,n}\}. \tag{14}$$

Значение нагрузки $q_{min,j}$ из соотношения (14) определим для заданного набора $(i_1, i_2, ..., i_n)$ согласно алгоритму:

- найдем значение кривизны $\frac{d^2 w_0(x)}{dx}$ из соотношения (7)
  - если слой j находится в области упругого деформирования (значение параметра конфигурации $i_j = 0$) или нахождения границы раздела z_j в указанной области (значение параметра конфигурации $i_j = 2$) при значении деформации, равной $\varepsilon = 0$ и $z = -h_{j-1}$;
  - если слой j находится в области нелинейного квазиупругого деформирования (значение параметра конфигурации $i_j = 1$) при значении деформации, равной $\varepsilon = \varepsilon_{0j}^{+}$ и $z = -h_{j-1}$;
- определим значения z_0, $q = q_{min}$ из системы уравнений (4), (5), (7), (8).

Аналогично находится значение нагрузки q_{max}

$$q_{max} = \max\{q_{max,1}, q_{max,2}, ..., q_{max,n}\}. \tag{15}$$

Значение нагрузки $q_{max,j}$ из соотношения (15) определим для заданного набора $(i_1, i_2, ..., i_n)$ согласно алгоритму:

- найдем значение кривизны $\frac{d^2 w_0(x)}{dx}$ из соотношения (7)
  - если слой j находится в области упругого деформирования (значение параметра конфигурации $i_j = 0$) при значении деформации, равной $\varepsilon = \varepsilon_{0j}^{+}$ и $z = -h_j$;
  - если слой j находится в области нелинейного квазиупругого деформирования или нахождения границы раздела z_j в указанной области (значение параметра конфигурации $i_j = 1$ или $i_j = 2$) при значении деформации, равной $\varepsilon = \varepsilon_{*j}^{+}$ и $z = -h_j$;
- определим значения z_0, $q = q_{max}$ из системы уравнений (4), (5), (7), (8).

Для исключения заведомо недостижимых предельных нагрузок проверим, чтобы деформация находилась при заданной предельной нагрузке в случае, если слой в области упругого деформирования, в интервале

$$0 \le \varepsilon \le \varepsilon_{0k}^{+}, \tag{16}$$

а для слоя в области нелинейного деформирования

$$\varepsilon_{0k}^{+} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{*k}^{+}, \tag{17}$$

при наличии границы раздела областей в интервале

$$0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{*k}^{+}, \tag{18}$$

причем указанные неравенства должны выполняться для всех слоев $k = 1, 2, ..., n$.

Подробно рассмотрим алгоритм проверки соответствия деформации неравенствам (16), (17) для нагрузки $q_{min,j}$ из (14).

Если $q_{min,j}$ определяется для j-го слоя, который находится в области упругого деформирования ($i_j = 0$) или области, содержащей границу раздела областей ($i_j = 2$), тогда, так как при определении указанной нагрузки, будет использовано предположение $\varepsilon = 0$ при $z = -h_{j-1}$, откуда из соотношения (7) следует, что $\varepsilon = 0$ вдоль всей толщины стержня в заданном сечении. Равенство $\varepsilon = 0$ для всех слоев $k = 1, 2, ..., n$ возможно только если ни один из слоев не находится в области нелинейного квазиупругого деформирования

$$i_1 \neq 1, i_2 \neq 1, i_3 \neq 1, ..., i_n \neq 1. \tag{19}$$

В случае нарушения равенства (19) для данного набора $(i_1, i_2, ..., i_n)$ соотношение q_j исключаем из (14).

Если $q_{min,j}$ определяется для j-го слоя, который находится в области нелинейного квазиупругого деформирования ($i_j = 1$), тогда, так как при определении указанной нагрузки было использовано предположение $\varepsilon = \varepsilon_{0j}^{+}$ при $z = -h_{j-1}$, откуда из соотношения (7) следует

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = \frac{\varepsilon_{0j}^{+}}{z_0 + h_{j-1}},$$

то при известной кривизне можно получить значение деформации вдоль всего сечения из (7)

$$\varepsilon = \frac{z_0 - z}{z_0 + h_{j-1}} \varepsilon_{0j}^{+}. \tag{20}$$

Соответственно, если рассматриваемая область i_k находится в области упругого деформирования ($i_k = 0$), необходимо, чтобы наибольшее по модулю значение деформации в k-ом слое (достигается на верхней границе слоя $z = -h_k$) было меньше предельно-упругого значения для данного слоя $\varepsilon = \varepsilon_{0k}^{+}$, т. е.

$$\frac{z_0 + h_k}{z_0 + h_{j-1}} \varepsilon_{0j}^{+} \leq \varepsilon_{0k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 0. \tag{21}$$

Если рассматриваемая область i_k находится в области нелинейного квазиупругого деформирования ($i_k = 1$), необходимо, чтобы наименьшее по модулю значение деформации в k-ом слое (достигается на нижней границе слоя $z = -h_{k-1}$) было больше предельно-упругого значения для данного слоя $\varepsilon = \varepsilon_{0k}^{+}$, т. е.

$$\frac{z_0 + h_{k-1}}{z_0 + h_{j-1}} \varepsilon_{0j}^{+} \geq \varepsilon_{0k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 1, \tag{22}$$

а наибольшее по модулю значение деформации (достигается на верхней границе слоя $z = -h_k$) было меньше значения предельного предразрушения для данного слоя

$\varepsilon = \varepsilon_{*k}^{+}$, причем указанное должно быть справедливо, если рассматриваемая область находится в области наличия границы раздела областей ($i_k = 2$)

$$\frac{z_0 + h_k}{z_0 + h_{j-1}} \varepsilon_{0j}^{+} \leq \varepsilon_{*k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 1, 2. \tag{23}$$

Аналогично определяются значения $q_{max,j}$ из соотношения (15).

Если $q_{max,j}$ определяется для j-го слоя, который находится в области нелинейного квазиупругого деформирования ($i_j = 1$) или области, содержащей границу раздела областей ($i_j = 2$), тогда, так как при определении указанной нагрузки было использовано предположение $\varepsilon = \varepsilon_{*k}^{+}$ при $z = -h_j$, то получим

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = \frac{\varepsilon_{*j}^{+}}{z_0 + h_j},$$

тогда при известной кривизне можно получить значение деформации вдоль всего сечения из (7)

$$\varepsilon = \frac{z_0 - z}{z_0 + h_j} \varepsilon_{*j}^{+}. \tag{24}$$

Соответственно необходимо, чтобы найденное значение деформации удовлетворяло неравенствам на верхней грани слоев для всех $k = 1, 2, ..., n$

$$\frac{z_0 + h_k}{z_0 + h_j} \varepsilon_{*j}^{+} \leq \varepsilon_{*k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 1, 2, \tag{25}$$

$$\frac{z_0 + h_k}{z_0 + h_j} \varepsilon_{*j}^{+} \leq \varepsilon_{0k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 0, \tag{26}$$

а на нижней грани соотношениям

$$\frac{z_0 + h_{k-1}}{z_0 + h_j} \varepsilon_{*j}^{+} \geq \varepsilon_{0k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 1, 2. \tag{27}$$

Если $q_{max,j}$ определяется для j-го слоя, который находится в области упругого деформирования ($i_j = 0$), тогда, так как при определении указанной нагрузки было использовано предположение $\varepsilon = \varepsilon_{0k}^{+}$ при $z = -h_j$, то получим

$$\frac{d^2 w_0}{dx^2} = \frac{\varepsilon_{0j}^{+}}{z_0 + h_j},$$

тогда при известной кривизне можно получить значение деформации вдоль всего сечения из (7)

$$\varepsilon = \frac{z_0 - z}{z_0 + h_j} \varepsilon_{0j}^{+}. \tag{28}$$

Соответственно необходимо, чтобы найденное значение деформации удовлетворяло неравенствам на верхней грани слоев для всех $k = 1, 2, ..., n$

$$\frac{z_0 + h_k}{z_0 + h_j} \varepsilon_{0j}^{+} \leq \varepsilon_{*k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 1, 2, \tag{29}$$

$$\frac{z_0 + h_k}{z_0 + h_j} \varepsilon_{0j}^{+} \leq \varepsilon_{0k}^{+} \quad \text{при} \quad i_k = 0, \tag{30}$$

а на нижней грани – соотношениям

$$\frac{z_0 + h_{k-1}}{z_0 + h_j}\varepsilon^+_{0j} \geq \varepsilon^+_{0k} \quad \text{при} \quad i_k = 1, 2. \tag{31}$$

ЛИТЕРАТУРА

[1] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Несущая способность многослойных бетонных стержней. Чебоксары: Изд-во Чуваш-го ун-та, 2022. 180 с.

[2] Немировский Ю. В., Болтаев А. И. Диаграммы деформирования бетонов и железобетонов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2015. № 6. с. 125–129.

[3] Мищенко А. В., Немировский Ю. В., Вохмянин И. Т. Рациональное и оптимальное проектирование слоистых стержневых систем. Новосибирск: НГАСУ, 2004. 488 с.

[4] Немировский Ю. В., Батурин А. А. Метод расчета деформативности и прочности однотавровых и двутавровых железобетонных стержней // Известия вузов. Строительство. 2015. № 10. С. 82–93.

[5] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Определение предельных нагрузок при поперечном изгибе многослойных предельно-упругих бетонных стержней // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2023. № 1(55). С. 86–101. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.0010.

Yu. V. Nemirovskii[1,2], *S. V. Tikhonov*[3]

ON DETERMINING THE POSITION OF THE NEUTRAL LINE IN THE CASE OF EXTREMELY ELASTIC BENDING OF MULTILAYER PHYSICALLY NONLINEAR CONCRETE RODS

[1]*S. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia*

[2]*Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia*

[3]*I. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

Abstract. This paper considers the problem of bending a multilayer rod under transverse loads in the presence of zones of elastic and nonlinear-inelastic deformation, and relations are obtained to determine the interface between the elastic and nonlinear-inelastic deformation regions of the rod. The resulting numerical calculations for cases of coincidence and non-coincidence of the neutral line with the axis of the rod. Numerical calculations of the limiting loads are presented: the first (the deformation reaches the limiting inelastic value) and the second (the deformation reaches the value of the pre-fracture strain).

Keywords: concrete rods, analytical solutions, physical nonlinearity, elasticity, transverse loads, neutral line

REFERENCES

[1] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Load-bearing capacity of multilayer concrete bars. Cheboksary: Publishing house of Chuvash University, 2022. 180 p.

[2] Nemirovsky Y. V., Boltaev A. I. Diagrams of deformation of concrete and reinforced concrete // Bulletin of Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. 2015. no. 6. p. 125–129.

[3] Mishchenko A. V., Nemirovsky Y. V., Vokhmyanin I. T. Rational and optimal design of layered rod systems. Novosibirsk: NSASU, 2004. 488 p.

[4] Nemirovsky Y. V., Baturin A. A. Method for calculating the deformability and strength of single-T and I-beam reinforced concrete rods // News of universities. Construction. 2015. no. 10. P. 82–93.

[5] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Determination of ultimate loads during transverse bending of multilayer extremely elastic concrete rods // Vestnik of the Chuvash State Pedagogical University named after. I. Ya. Yakovleva. Series: Limit State Mechanics. 2023. no. 1(55). P. 86–101. DOI: 10.37972/chgpu.2023.55.1.0010.

[6] Nemirovsky Y. V. Ultimate deformation of hybrid reinforced concrete structures // Bulletin of the Chuvash State Pedagogical University named after. I. Ya. Yakovleva. Series: Limit State Mechanics. 2018. no. 3(37). P. 26–37.

Nemirovskii Yuri Vladimirovich, Dr. Sci. Phys. & Math., Professor, Leading Research Worker, S. Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics of the Siberian Branch of the RAS, Novosibirsk, Russia, Professor, Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

Tikhonov Sergey Vladimirovich, PHD, Assoc. Prof., I. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia.