

Ю. В. Немировский<sup>1,2</sup>, С. В. Тихонов<sup>3</sup>

## ПРОДОЛЬНО-ПОПЕРЕЧНЫЙ ИЗГИБ МНОГОСЛОЙНЫХ БЕТОННЫХ СТЕРЖНЕЙ АРМИРОВАННЫХ СТАЛЬНОЙ АРМАТУРОЙ ПОД ДЕЙСТВИЕМ МАССОВЫХ СИЛ

<sup>1</sup>Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
г. Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

<sup>3</sup>Чувашский государственный университет им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия

**Аннотация.** В работе рассматриваются многослойные бетонные стержни постоянного поперечного сечения армированные стальной арматурой. Предполагается, что в стержне имеет место одноосное напряженное состояние. На примере армирования сталями марок А240, А400, А800 показано влияние степени армирования на несущую способность стержня. Рассматриваются случаи армирования как только одного из слоев стержня, так и армирование всех слоев одновременно.

**Ключевые слова:** продольно-поперечный изгиб, стержень, арматура, сталь, бетон, предельная деформация, железобетон, диаграмма деформирования бетона, растяжение, сжатие, метод Бубнова-Галеркина, системы нелинейных алгебраических уравнений

DOI: 10.37972/chgpu.2021.48.2.011

УДК: 539.374

При строительстве зданий и сооружений стоимость материалов, которые используются при строительстве, зачастую превышает половину всех затрат [1]. Эффективное использование материалов при проектировании указанных объектов если известны

---

© Немировский Ю. В., Тихонов С. В. 2021

*Немировский Юрий Владимирович*

e-mail: nemiryuy@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: strangheb@mail.ru, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры компьютерных технологий Чувашского государственного университета им. И. Н. Ульянова, г. Чебоксары, Россия.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-01-00038.

Поступила 19.07.2021

заранее условия их эксплуатации может существенно снизить стоимость готового объекта.

Одним из путей повышения несущей способности указанных конструкций при заданных нагрузках и сопоставимой стоимости материалов является изменение формы и параметров формы поперечного сечения. В работах [2–5] показано как на примере заземленного с обоих концов железобетонного стержня можно существенно повысить сопротивляемость стержня прилагаемым нагрузкам если изменять форму и параметры формы сечения стержня.

Другим путем повышения несущей способности является использование материалов с высокими эксплуатационными характеристиками. В работе [6] показаны примеры расчета стержней из бетонов и сталефибробетонов. Показано, что использование сталефибробетонов существенно повышает способность конструкций выдерживать прилагаемые нагрузки.

Одним из недостатков указанного способа является высокая стоимость материалов. Поэтому на первый план при проектировании указанных изделий встает рациональное использование материалов.

В данной работе будем рассматривать возможность повышения несущей способности стержней за счет армирования стальными стержнями. Считаем, что стержни имеют постоянное поперечное сечение (рис. 1). Через  $h_i$  обозначим высоты соответствующих слоев стержня,  $b_i(z)$  – функции ограничивающие контуры поперечного сечения  $i$ -го слоя стержня. Будем полагать, что форма поперечного сечения является симметричной относительно оси  $OZ$ . В каждом из слоев могут быть реализованы разные марки бетонов и стержень может быть армирован разными марками сталей. Степень армирования в каждом слое может быть различной. Ось  $Ox$  направим вдоль оси стержня, ось  $OZ$  вертикально вверх.

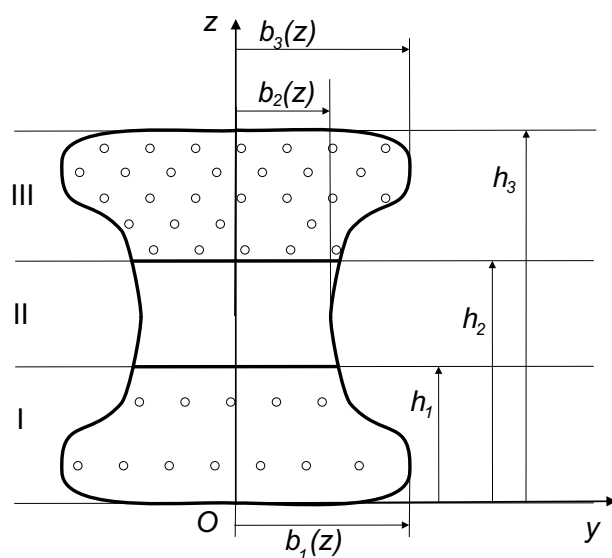


Рис. 1. Трехслойный железобетонный стержень

В качестве аппроксимации диаграммы  $\sigma - \varepsilon$  бетонов  $i$ -го слоя будем рассматривать аппроксимацию полиномами третьего порядка

$$\sigma_i^c = A_{1i}\varepsilon + A_{2i}\varepsilon^2 + A_{3i}\varepsilon^3. \quad (1)$$

где коэффициенты  $A_{1i}$ ,  $A_{2i}$ ,  $A_{3i}$  характеризуют физические свойства бетона и могут быть определены из реальных диаграмм растяжения-сжатия бетонов. Индекс «с» обозначает напряжение возникающее в бетонах.

При использовании экспериментальных данных из работ [7, 8] с помощью метода наименьших квадратов в работе [9] были получены необходимые коэффициенты для ряда бетонов. Они приведены в таблице 1.

Марка бетона	$\varepsilon_*^-, 10^{-2}$	$\varepsilon_*^+, 10^{-2}$	$A_{1i}$ , МПА	$A_{2i}$ , МПА	$A_{3i}$ , МПА
B10	0,2	0,015	11 886	5 062 224	677 466 265
B30	0,2	0,015	31 584	12 719 591	1 584 070 150
B50	0,2	0,015	53 813 327	23 019 984	2 879 326 489

Таблица 1. Значения физических параметров бетонов в случае аппроксимацию полиномом третьего порядка

В качестве критерия условного предельного состояния в  $i$ -ом слое принимаем достижение в нем максимальной деформации предельно допустимого значения при растяжении  $\varepsilon_*^+$  или сжатии  $\varepsilon_*^-$ . Значения  $\varepsilon_*^+$ ,  $\varepsilon_*^-$  на диаграмме растяжения-сжатия бетонов соответствуют точкам начала ниспадающей ветви (точки разрушения).

Для сталей марок А240, А400, А800 значение физических параметров приведено в таблице 2 по результатам испытаний стальных стержней диаметром 10 мм, изложенных в работе [7, 8]. Будем принимать, что сталь на растяжение и сжатие «работает» одинаково, т.е. диаграмма растяжения-сжатия симметрична относительно начала координат. В таблице через  $E$  обозначен модуль упругости стали, а отрезок  $[0, \varepsilon_E]$  соответствует упругому участку растяжения-сжатия стали.

Марка стали	$E$ , МПА	$\varepsilon_E, 10^{-2}$	$\rho_s$ , кг/м <sup>3</sup>
A240	211 050	0,2	7 850
A400	197 000	0,4	7 850
A800	189 050	0,9	7 850

Таблица 2. Значения физических параметров сталей

Из таблиц 1, 2 видно, что для всех рассматриваемых бетонов и марок стали предельная деформация бетона как при растяжении так и при сжатии по модулю меньше чем величина  $\varepsilon_E$ . Соответственно сталь будет работать только в упругой зоне. Соответственно можем принять, что для стали имеет место

$$\sigma_i^s = E_i\varepsilon, \quad (2)$$

где  $E_i$  – модуль упругости стали, который используется в соответствующем слое.

Тогда для напряжения в  $i$ -ом слое будет иметь место [10]

$$\sigma_i = \nu_i \sigma_i^s + (1 - \nu_i) \sigma_i^c = \nu E_i \varepsilon + (1 - \nu_i) (A_{1i} \varepsilon + A_{2i} \varepsilon^2 + A_{3i} \varepsilon^3), \quad (3)$$

где коэффициент  $\nu_i (0 \leq \nu_i \leq 1)$  – степень армирования бетона.

Изгибающие моменты и продольное усилие определим из соотношений

$$N = \sum_{i=1}^n \int_{S_i} \sigma_i dS, \quad M_y = \sum_{i=1}^n \int_{S_i} \sigma_i z dS, \quad (4)$$

уравнения равновесия имеют вид

$$\frac{d^2 M_y}{dx^2} = q_z - \frac{dm_y}{dx}, \quad \frac{dN}{dx} = -q_x. \quad (5)$$

где  $q_x$ ,  $q_z$  – проекции вектора внешних усилий на соответствующие оси,  $m_y$  – проекция вектора распределенного момента на ось  $y$ .

Будем считать, что имеют место гипотезы Кирхгофа-Лява

$$\varepsilon(x, z) = \varepsilon_0(x) - z \varkappa_y(x), \quad (6)$$

$$\varepsilon_0(x) = \frac{du_0}{dx}, \quad \varkappa_y = \frac{d^2 w_0}{dx^2}, \quad (7)$$

где  $u_0$ ,  $w_0$  – компоненты вектора перемещений точек осевой линии стержня вдоль осей  $x$  и  $z$  соответственно.

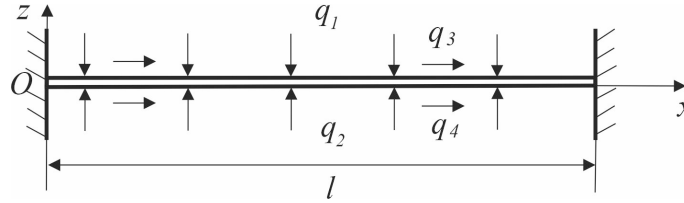


Рис. 2. Защемленный с обоих концов стержень

Рассмотрим задачу продольно-поперечного изгиба защемленного с обоих концов стержня (рис. 3), тогда из условий закрепления стержня имеем

$$u_0(0) = w_0(0) = u_0(l) = w_0(l) = 0, \quad (8)$$

$$\left. \frac{dw_0}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{dw_0}{dx} \right|_{x=l} = \left. \frac{du_0}{dx} \right|_{x=0} = \left. \frac{du_0}{dx} \right|_{x=l} = 0. \quad (9)$$

Из уравнений (5)-(7) получим систему дифференциальных уравнений относительно перемещений с граничными условиями (8)-(9).

Указанную систему дифференциальных уравнений будем решать методом Бубнова-Галеркина [11].

Положим

$$u_0(x) = \sum_{k=1}^N B_k y_k(x), \quad w_0(x) = \sum_{k=1}^N C_k r_k(x), \quad (10)$$

где  $B_k$ ,  $D_k$  – постоянные.

Будем считать  $y_k(x)$ ,  $r_k(x)$  в выражении (10) равными

$$y_k(x) = r_k(x) = \cos \frac{k-1}{l} \pi x - \cos \frac{k+1}{l} \pi x. \quad (11)$$

тогда граничные условия будут удовлетворены, причем изгибающие моменты и продольное усилие в местах защемления стержня будут отличны от нуля.

Если подставить перемещения (10) в полученные дифференциальные уравнения и обозначить через  $L_1(x)$ ,  $L_2(x)$  левые части соответствующих уравнений, положив в качестве базисных функций в методе Бубнова-Галеркина те же функции, что и в разложении (10)

$$f_k(x) = \cos \frac{k-1}{l} \pi x - \cos \frac{k+1}{l} \pi x, \quad k = 1 \dots N, \quad (12)$$

получим систему из  $2N$  алгебраических уравнений относительно  $2N$  неизвестных  $B_k$ ,  $C_k$ ,  $k = 1 \dots N$ ,

$$\int_0^l L_i(x) f_k(x) dx = 0, \quad i = 1 \dots 3, \quad k = 1 \dots N. \quad (13)$$

Значения  $B_k$ ,  $C_k$  можно определить из полученной системы уравнений каким-либо численным методом.

Пусть на стержень действуют распределенные нагрузки  $q_1, q_2, q_3, q_4$  и сила тяжести проекция которой на соответствующие оси равна  $q_{sx}, q_{sz}$ .

Тогда для усилий и моментов имеет место

$$q_x = 2 \int_0^{b_1(0)} q_3 dy + 2 \int_0^{b_n(h_n)} q_4 dy + 2 \sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz \int_0^{b_i(z)} q_{sx} dy, \quad (14)$$

$$q_z = 2 \int_0^{b_1(0)} q_2 dy + 2 \int_0^{b_n(h_n)} q_1 dy + 2 \sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz \int_0^{b_i(z)} q_{sz} dy, \quad (15)$$

$$m_y = -2 \int_0^{b_n(h_n)} x q_1 dy - 2 \int_0^{b_1(0)} x q_2 dy + 2 h_n \int_0^{b_n(h_n)} q_3 dy - \\ - 2 \sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_i} dz \int_0^{b_i(z)} (x q_{sz} - z q_{sx}) dy. \quad (16)$$

Действующие нагрузки  $q_1, q_2, q_3, q_4, q_{sx}, q_{sz}$  примем равными

$$q_1 = t_{11} + t_{12}x, \quad q_2 = t_{21} + t_{22}x, \quad q_3 = t_{31} + t_{32}x, \quad q_4 = t_{41} + t_{42}x, \quad (17)$$

$$q_{sx} = g_x \sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_{i+1}} ((1 - \nu_i) \rho_{ci} + \nu_i \rho_{si}) b_i(z) dz, \quad (18)$$

$$q_{sz} = g_z \rho \sum_{i=1}^3 \int_{h_{i-1}}^{h_{i+1}} ((1 - \nu_i) \rho_{ci} + \nu_i \rho_{si}) b_i(z) dz, \quad (19)$$

где  $t_{11}, t_{12}, t_{21}, t_{22}, t_{31}, t_{32}, t_{41}, t_{42}$  – постоянные,  $g_x, g_z$  – проекции вектора ускорения свободного падения,  $\rho_{ci}, \rho_{si}$  – плотности бетона и стали соответствующих слоев стержня.

Для иллюстрации данной методики рассмотрим стержень форма поперечного сечения которого имеет вид изображенный на рис. 3. На указанном рисунке марка бетона из которого сделан материал слоя указан напротив соответствующего номера слоя.

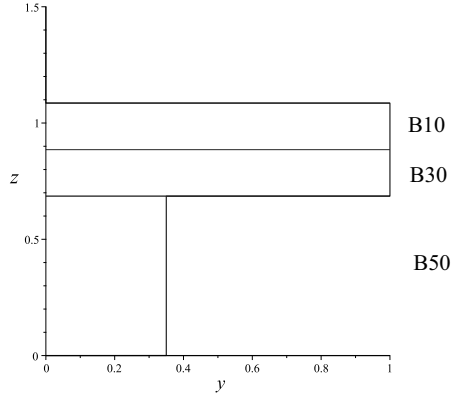


Рис. 3. Форма поперечного сечения стержня

Примем в качестве постоянных характеризующих нагрузки (17) следующие значения

$$t_{11} = -90 \frac{\text{КН}}{\text{М}}, t_{12} = -2 \frac{\text{КН}}{\text{М}^2}, t_{21} = t_{22} = 0, t_{31} = -160 \frac{\text{КН}}{\text{М}}, t_{32} = -2 \frac{\text{КН}}{\text{М}^2}, t_{41} = t_{42} = 0.$$

Примем, что сила тяжести направлена вертикально вниз, т.е.  $g_x = 0, g_z = -9.81$ . Плотность бетона примем для всех марок бетона одинаковой и равной  $2500 \text{кг/М}^3$ .

Положим в данном примере, что степень армирования одинаковая во во всех слоях, т.е.

$$\nu = \nu_1 = \nu_2 = \nu_3. \quad (20)$$

В дальнейшем будем находить для каждого слоя  $i$  максимальную деформацию  $\varepsilon_{mi}$ , которая возникает в данном слое стержня. Рассмотрим отношение найденной максимальной деформации  $\varepsilon_{mi}$  к соответствующему значению предельной деформации  $\varepsilon_{i*}^+$  для каждого из слоев бетона. Если окажется, что  $\varepsilon_{mi} > \varepsilon_{i*}^+$  хотя бы одним из слоев, то мы будем считать, что стержень теряет несущую способность. Рассмотрим коэффициент  $\gamma_i$  для  $i$ -го слоя, который определяется из соотношений (21)

$$\gamma_i = 100\% \frac{\varepsilon_{mi}}{\varepsilon_{i*}^+}. \quad (21)$$

Если окажется значение  $\gamma_i$  больше 100% хотя бы в одном из слоев стержня, то конструкция не способна выдерживать прилагаемые нагрузки. Для удобства расчетов будем рассматривать величину  $\gamma = \max\{\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3\}$ .

Стоимость готового изделия можно снизить, если положить, что армируются не все слои стержня, а только, например, какой-то один из слоев. Тогда случай армирования только первого слоя будет соответствовать уравнениям (22), второго – (23), третьего – (24), случай же одинакового армирования всех слоев стержня соотношениями – (25).

$$\nu = \nu_1, \quad \nu_2 = \nu_3 = 0. \quad (22)$$

$$\nu = \nu_2, \quad \nu_1 = \nu_3 = 0. \quad (23)$$

$$\nu = \nu_3, \quad \nu_1 = \nu_2 = 0. \quad (24)$$

$$\nu = \nu_1 = \nu_2 = \nu_3. \quad (25)$$

Если последовательно изменять значения  $\nu$  от 0 до 1 с шагом  $\frac{5}{100}$  м. и рассчитывать значение  $\gamma$  для каждого  $\nu$ , то график полученных зависимостей будут иметь вид, изображенный на рис. 4, максимальный прогиб конструкции  $w_m$  в зависимости от параметра параметра  $\nu$  изобразим на рис. 5.

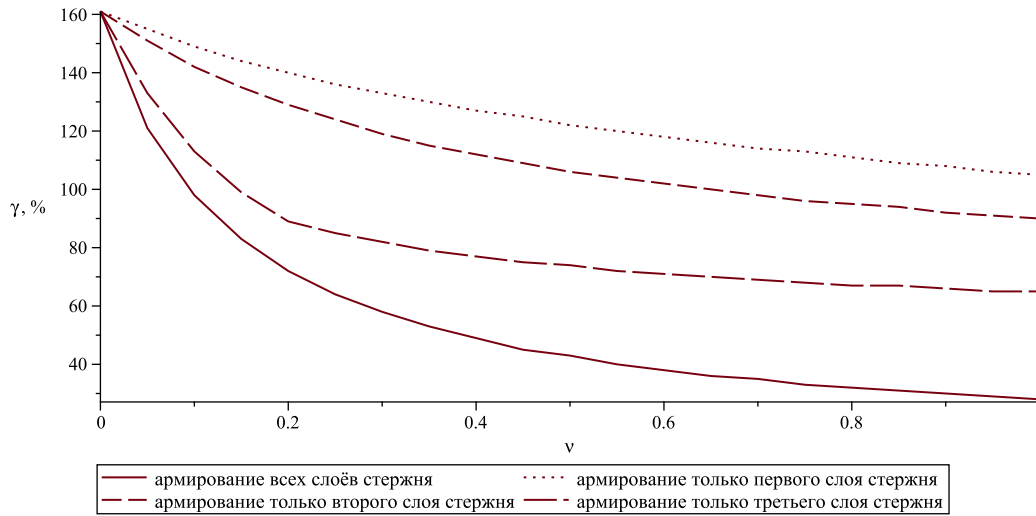


Рис. 4. Зависимость  $\gamma$  от степени армирования  $\nu$

Как видно из полученных решений, наибольшую несущую способность при заданных нагрузках будет иметь стержень у которого армированы все слои стержня, т.е. случай (25). В этом случае стержень способен выдержать приложенные нагрузки в случае если степень армирования всех слоев  $\nu > \frac{10}{100}$ .

Существенно снизить расход арматуры при заданных нагрузках и соответственно стоимость готового изделия можно, если армировать не все слои стержня, а только третий слой стержня (24). В этом случае стержень способен выдержать приложенные нагрузки уже при степени армирования третьего слоя  $\nu > \frac{15}{100}$ .

Гораздо больше арматуры потребуется если армировать только второй слой стержня (23). В этом случае степень армирования второго слоя должна соответствовать  $\nu > \frac{70}{100}$ .

Если армировать только третий слой стержня (22), то даже при полном замене его на арматуру  $\nu = 1$  он оказывается не способным выдерживать приложенные к нему нагрузки.

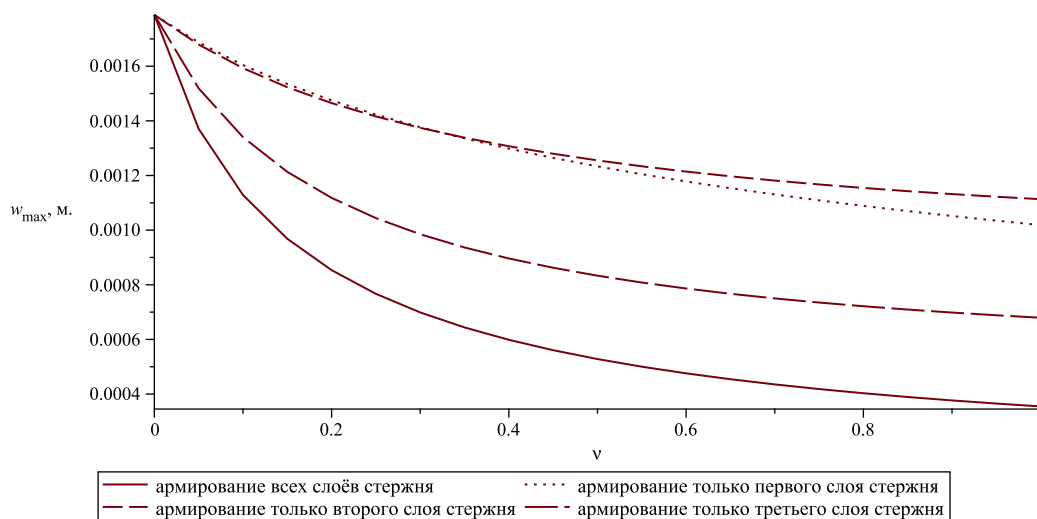


Рис. 5. Зависимость величины прогиба  $w$  от степени армирования  $\nu$

Таким образом за счет армирования бетонных стержней можно существенно повысить их несущую способность при заданных нагрузках. Причем используя указанную в данной работе методику определения оптимального процента армирования определенных слоев бетонных стержней можно существенно снизить стоимость готового изделия.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Управление технологическими процессами производства модифицированных бетонов / В. А. Кудяков, А. И. Кудяков, С. А. Лукьянчиков [и др.] // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 6. С. 116–126.
- [2] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Предельное состояние бетонных и железобетонных стержней при сложном и продольно-поперечном изгибе // Вестник ПНИПУ. Механика. 2020. № 1. с. 60–73.
- [3] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Влияние формы поперечного сечения и силы тяжести на деформирование многослойных бетонных стержней при квазистатических нагрузках // Моделирование и механика конструкций. 2020. № 12. С. 11–49.
- [4] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Влияние формы поперечного сечения многослойного бетонного стержня на несущую способность при продольно-поперечной нагрузке // Механика композиционных материалов и конструкций, сложных и гетерогенных сред. Сборник тезисов 9-й всероссийской научной конференции с международным участием им. И.Ф. Образцова и Ю.Г. Яновского, посвященной 30-летию ИПРИМ РАН. 2019. С. 185–189.
- [5] Nemirovskii Y. V., Tikhonov S. V. Longitudinal-transverse bending of physically nonlinear rods by quasi-static loads and mass forces // Lecture Notes in Civil Engineering. 2021. Vol. 170.
- [6] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Продольно-поперечный изгиб многослойных стержней из бетонов и сталефибробетонов // Известия Алтайского государственного университета. 2021. № 1(117). С. 40–46.
- [7] Иващенко Е. И. Разработка методов расчета железобетонных элементов на основе действительных диаграмм деформирования материалов с учетом фактического изменения площади их поперечных сечений // дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2006. 230 с.
- [8] Маилян Л. Р., Иващенко Е. И. Расчет железобетонных элементов на основе действительных диаграмм деформирования материалов. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростовский гос. строит. ун-т, 2006. 222 с.



- [9] Nemirovskii Y. V., Tikhonov S. V. Longitudinal-Transverse Bending of Reinforced Concrete Rods on The Basis of Nonlinear Diagrams of Deformation of Phase Materials // AIP Conference Proceedings. 2021.
- [10] Немировский Ю. В., Тихонов С. В. Предельные состояния железобетонных балок // Вестник Чувашского государственного педагогического университета им. И. Я. Яковлева. Серия: Механика предельного состояния. 2016. № 3. с. 134–158.
- [11] Голоскоков Д. П. Построение базиса для одномерных краевых задач в системах символьных вычислений // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2017. Т. 1. С. 77–85.

*Yu. V. Nemirovskii, S. V. Tikhonov*

### LONGITUDINAL-TRANSVERSE BENDING OF MULTILAYER CONCRETE RODS REINFORCED WITH STEEL REINFORCEMENT UNDER THE INFLUENCE OF MASS FORCES

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

*Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia*

*I. Ulyanov Chuvash State University, Cheboksary, Russia*

**Abstract.** The paper deals with multilayer concrete rods of constant cross-section reinforced with steel reinforcement. It is assumed that there is a uniaxial stress state in the bar. Using the example of reinforcement with steels of grades A240, A400, A800, the influence of the degree of reinforcement on the bearing capacity of the bar is shown. Cases of reinforcement of both only one of the layers of the bar and reinforcement of all layers at the same time are considered.

**Keywords:** longitudinal-transverse bending, bar, reinforcement, steel, concrete, ultimate deformation, reinforced concrete, concrete deformation diagram, tension, compression, Bubnov-Galerkin method, systems of nonlinear algebraic equations

### REFERENCES

- [1] Management of technological processes for the production of modified concrete / V. A. Kudyakov, A. I. Kudyakov, S. A. Lukyanchikov et al. // Bulletin of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering. 2017. no. 6. P. 116–126.
- [2] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Limit state of concrete and reinforced concrete rods in complex and longitudinal-transverse bending // Bulletin of PNRPU. Mechanics. 2020. no. 1. p. 60–73.
- [3] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Influence of the cross-sectional shape and gravity on the deformation of multilayer concrete bars under quasi-static loads // Structural Modeling and Mechanics. 2020. no. 12. P. 11–49.
- [4] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Influence of the cross-sectional shape of a multilayer concrete bar on the bearing capacity under longitudinal-transverse load // Mechanics of composite materials and structures, complex and heterogeneous media. Collection of Abstracts of the 9th All-Russian Scientific Conference with International Participation named after V.I. I.F. Obraztsov and Yu.G. Yanovsky dedicated to the 30th anniversary of the IPRIM RAS. 2019. P. 185–189.

---

*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, Novosibirsk state technical University, Novosibirsk, Russia.

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

- [5] Nemirovskii Y. V., Tikhonov S. V. Longitudinal-transverse bending of physically nonlinear rods by quasi-static loads and mass forces // *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2021. Vol. 170.
- [6] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Longitudinal-transverse bending of multilayer concrete and steel fiber reinforced concrete rods // *Bulletin of Altai State University*. 2021. no. 1 (117). P. 40–46.
- [7] Nemirovskii Y. V., Tikhonov S. V. Longitudinal-Transverse Bending of Reinforced Concrete Rods on The Basis of Nonlinear Diagrams of Deformation of Phase Materials // *AIP Conference Proceedings*. 2021.
- [8] Ivaschenko E. I. Development of methods for calculating reinforced concrete elements based on actual deformation diagrams of materials taking into account the actual change in the area of their cross-sections // *Dis. ... Cand. Tech. Sciences*. Voronezh, 2006. 230 p.
- [9] Mayilyan L., Ivaschenko E. Calculation of reinforced concrete members based on actual material deformation diagrams. Rostov-on-Don: Publishing house Rostov State Building University, 2006. 222 p.
- [10] Nemirovsky Y. V., Tikhonov S. V. Limit states of reinforced concrete beams // *Vestnik of the Yakovlev Chuvash State Pedagogical University. Series: Mechanics of Limit State*. 2016. no. 3. P. 134–158.
- [11] Goloskokov D. Construction of a basis for one-dimensional boundary value problems in symbolic computation systems // *Space, Time and Fundamental Interactions*. 2017. Vol. 1. P. 77–85.