

Для цитирования: Зотов И.М., Чепурненко А.С., Языев С.Б. Расчет на устойчивость плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения с учетом ползучести. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2019; 46 (1): 169-176. DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-169-176

For citation: Zotov I.M., Chepurnenko A.S., Yazyev S.B. Calculation of the flat bending shape stability of rectangular cross section beams with regard to creep. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2019; 46 (1): 169-176. (in Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-169-176

СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

УДК 624.04

DOI:10.21822/2073-6185-2019-46-1-169-176

РАСЧЕТ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ПЛОСКОЙ ФОРМЫ ИЗГИБА БАЛОК ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ С УЧЕТОМ ПОЛЗУЧЕСТИ

Зотов И.М.², Чепурненко А.С.², Языев С.Б.¹

¹⁻³ Донской государственный технический университет,

¹⁻³ 344002, Ростов -на-Дону, площадь Гагарина, 1, Россия,

¹e-mail:ps62@yandex.ru, ²e-mail:anton_chepurnenk@mail.ru, ³e-mail: z-o-t-o-v@mail.ru

Резюме. Цель. В статье приводится вывод разрешающего уравнения для расчета на устойчивость плоской формы деформирования призматических балок с учетом реологических свойств материала. **Метод.** Задача сводится к дифференциальному уравнению второго порядка относительно угла закручивания, решение которого выполняется численно методом конечных разностей в сочетании с методом Эйлера. **Результат.** Полученное дифференциальное уравнение позволяет учесть наличие начальных несовершенств в виде начального прогиба балки, начального угла закручивания, а также эксцентриситета приложения нагрузки. Представлено решение тестовой задачи для консольной полимерной балки под действием сосредоточенной силы. В качестве закона ползучести используется нелинейное уравнение Максвелла-Гуревича. Введена величина длительной критической нагрузки и показано, что при нагрузке меньше длительной критической ползучесть носит ограниченный характер. Установлено, что, как и для сжатых стержней, при нагрузке меньше длительной критической скорость роста перемещений во времени затухает. При $F = F_{дл}$ перемещения растут с постоянной скоростью, и при $F > F_{дл}$ скорость роста перемещений возрастает во времени. Полученные результаты подтверждают достоверность выбранной методики. **Вывод.** Получено универсальное разрешающее уравнение для расчета на устойчивость плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения, подходящее для произвольных законов ползучести.

Ключевые слова: устойчивость, плоская форма изгиба, ползучесть, численные методы, начальные несовершенства

BUILDING AND ARCHITECTURE

CALCULATION OF THE FLAT BENDING SHAPE STABILITY OF RECTANGULAR CROSS SECTION BEAMS WITH REGARD TO CREEP

Ivan M. Zotov³, Anton S. Chepurnenko², Serdar B. Yazyev¹

¹⁻³Don State Technical University,

¹⁻³1 Gagarin Square, Rostov-on-Don 344002, Russia,

¹e-mail:ps62@yandex.ru, ²e-mail:anton_chepurnenk@mail.ru, ³e-mail: z-o-t-o-v@mail.ru

Abstract Objectives. The article presents the conclusion of the resolving equation for calculating the stability of the flat form of deformation of prismatic beams, taking into account the rheological properties of the material. **Method.** The problem is reduced to a second-order differential equation for the twist angle, which is solved numerically by the finite difference method in combination with the Euler method. **Result.** The obtained differential equation allows one to take into account the presence of initial imperfections in the form of the initial deflection of the beam, the initial angle of twist, and also the eccentricity of the applied load. The solution of the test problem for a cantilever polymer beam under the action of a concentrated force is presented. The non-linear Maxwell-Gurevich equation is used as the creep law. The value of the long-term critical load is introduced and it is shown that with a load less than the long-term critical creep is limited. It has been established that, as with the squeezed rods, with a load less than the long-term critical, the growth rate of the displacements with time decays. When $F = F_{dl}$, the displacements grow at a constant speed, and when $F > F_{dl}$, the growth rate of displacements increases with time. The results obtained confirm the validity of the chosen method. **Conclusion.** A universal resolving equation is obtained for calculating the stability of a flat shape of bending of rectangular beams, suitable for arbitrary creep laws.

Keywords: stability, flat bending shape, creep, numerical methods, initial imperfections

Введение. При проектировании балок прямоугольного сечения в целях снижения расхода материала стремятся повысить отношение высоты поперечного сечения к ширине, откуда вытекает необходимость проверки конструкции на устойчивость плоской формы изгиба. Расчету призматических балок на устойчивость плоской формы деформирования посвящено большое количество работ, включая [1-9]. Однако во всех указанных публикациях решение выполняется в упругой постановке.

Постановка задачи. В настоящей работе будет рассмотрено решение данной задачи с учетом ползучести.

Методы исследования. Вывод разрешающих уравнений.

При выводе основного уравнения в качестве критерия устойчивости будем использовать критерий начальных несовершенств. Начальные неправильности задаются в виде начальной погиби $v_0(x)$, начального угла закручивания $\theta_0(x)$ и эксцентриситета e . Критическое время при использовании указанного критерия определяется условно путем задания предельной величины перемещений или предельной скорости их роста.

Элемент балки после выпучивания представлен на рис. 1.

При боковом выпучивании балки в ней возникает крутящий момент M_x .

Сумму моментов запишем для оси x идеальной недеформированной балки:

$$M_x + dM_x + qdx \left(\frac{v + v_0 + (v + v_0 + d(v + v_0))}{2} + e + a(\theta + \theta_0) \right) - M_x = 0. \quad (1)$$

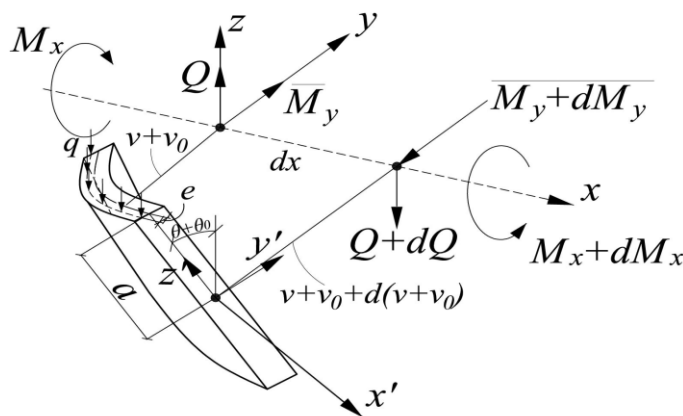


Рис.1. Элемент балки после деформации
Fig.1. Beam element after deformation

После отбрасывания величин более высокого порядка малости, получим:

$$\frac{dM_x}{dx} = -q(v + v_0 + e + a(\theta + \theta_0)). \quad (2)$$

Крутящий момент, действующий относительно оси x' , можно вычислить по формуле:

$$M_{x'} = M_x - Q(v + v_0) + M_y \left(\frac{dv}{dx} + \frac{dv_0}{dx} \right). \quad (3)$$

Для балки, испытывающей изгиб в двух плоскостях, полные линейные деформации на основе гипотезы плоских сечений можно определить по формуле:

$$\varepsilon_x = -y \frac{d^2 v}{dx^2} - z \frac{d^2 w}{dx^2}. \quad (4)$$

С другой стороны, полные деформации ε_x представляют сумму упругих деформаций и деформаций ползучести:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} + \varepsilon_x^*. \quad (5)$$

Подставляя (4) в (5) и выражая напряжения через деформации, получим:

$$\sigma_x = -E \left(y \frac{d^2 v}{dx^2} + z \frac{d^2 w}{dx^2} + \varepsilon_x^* \right). \quad (6)$$

Изгибающие моменты вычисляются следующим образом:

$$M_y = - \int_A \sigma_x z dA; \quad M_{z'} = \int_A \sigma_x y dA. \quad (7)$$

Подставив (6) в (7), получим:

$$M_y = EI_y \frac{d^2 w}{dx^2} - M_y^*; \quad M_{z'} = -EI_z \frac{d^2 v}{dx^2} - M_{z'}, \quad (8)$$

где $M_y^* = -E \int_A \varepsilon_x^* \cdot z dA$, $M_{z'}^* = E \int_A \varepsilon_x^* \cdot y dA$.

В работе [10] рассматривалась задача кручения стержней некруглого поперечного сечения с учетом ползучести, и была получена следующая связь между углом закручивания и крутящим моментом:

$$M_{x'} = M_k = GI_k \frac{d\theta}{dx} - M_k^*, \quad (9)$$

где $M_k^* = G \int_A (-\gamma_{xy}^* z + \gamma_{xz}^* y) dA$, I_k – момент инерции при кручении.

Приравняв (9) к (3), получим:

$$GI_k \frac{d\theta}{dx} - M_k^* = M_x - Q(v + v_0) + M_y \left(\frac{dv}{dx} + \frac{dv_0}{dx} \right). \quad (10)$$

Продифференцируем далее равенство (10) по x , учитывая, что балка может иметь переменную жесткость, т.е. крутильная жесткость GI_k является функцией от x :

$$GI_K \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_K)}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{dM_K^*}{dx} = \frac{dM_x}{dx} - \frac{dQ}{dx}(v + v_0) - Q \frac{d(v + v_0)}{dx} + \frac{dM_y}{dx} \frac{d(v + v_0)}{dx} + M_y \frac{d^2(v + v_0)}{dx^2}. \quad (11)$$

Подставим далее (2) в (11) и учтем, что $\frac{dQ}{dx} = -q$, а $\frac{dM_y}{dx} = Q$:

$$GI_K \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_K)}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{dM_K^*}{dx} = -q(v + v_0 + e + a(\theta + \theta_0)) + q(v + v_0) - Q \frac{d(v + v_0)}{dx} + Q \frac{d(v + v_0)}{dx} + M_y \frac{d^2v}{dx^2} + M_y \frac{d^2v_0}{dx^2}. \quad (12)$$

После упрощений равенство (12) примет вид:

$$GI_K \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_K)}{dx} \frac{d\theta}{dx} - \frac{dM_K^*}{dx} = -q(e + a(\theta + \theta_0)) + M_y \frac{d^2v}{dx^2} + M_y \frac{d^2v_0}{dx^2}. \quad (13)$$

Выразим из (8) величину $\frac{d^2v}{dx^2}$:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M_{z'} + M_z^*}{EI_z}. \quad (14)$$

Учитывая, что $M_{z'} = M_y(\theta + \theta_0)$, перепишем равенство (14) в виде:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = -\frac{M_y(\theta + \theta_0)}{EI_z} - \frac{M_z^*}{EI_z}. \quad (15)$$

Подставив (15) в (13), получим основное разрешающее уравнение:

$$GI_K \frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d(GI_K)}{dx} \frac{d\theta}{dx} + \left(\frac{M_y^2}{GI_K EI_z} + qa \right) \theta = \frac{dM_K^*}{dx} - q(e + a\theta_0) + M_y \frac{d^2v_0}{dx^2} - \frac{M_y M_z^*}{EI_z} - \frac{M_y^2 \theta_0}{EI_z}. \quad (16)$$

Для расчета вводится сетка по времени t , координате x , а также поперечное сечение разбивается на отрезки Δy и Δz .

На первом этапе выполняется решение уравнения (16) методом конечных разностей при $t = 0$, $\varepsilon_x^* = 0$, $\gamma_{xz}^* = \gamma_{xy}^* = 0$, $M_K^* = 0$, $M_y^* = 0$, $M_z^* = 0$.

Определив из уравнения (16) угол закручивания $\theta(x)$, вычисляем для каждого сечения относительный угол закручивания $\vartheta = \frac{d\theta}{dx}$.

Далее для каждого сечения по x вычисляются касательные напряжения путем решения, полученного в [10] дифференциального уравнения:

$$\nabla^2 \Phi(y, z) + 2G\vartheta - G \left(\frac{\partial \gamma_{xz}^*}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}^*}{\partial z} \right) = 0, \quad (17)$$

где Φ – функция напряжений, задаваемая формулами:

$$\tau_{xy} = \frac{\partial \Phi}{\partial z}; \tau_{xz} = -\frac{\partial \Phi}{\partial y}. \quad (18)$$

Также определяются изменения кривизны.

Величина $\frac{d^2v}{dx^2}$ определяется по формуле (14), а значения $\frac{d^2w}{dx^2}$ можно вычислить по формуле:

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = \frac{M_y + M_y^*}{EI_y}. \quad (19)$$

Зная изменения кривизн, можно определить нормальные напряжения по формуле (6). Далее по величинам нормальных и касательных напряжений определяются скорости роста деформаций ползучести.

Затем при помощи метода Эйлера находятся деформации $\gamma_{xz}^*, \gamma_{xy}^*, \varepsilon_x^*$ в момент времени $t + \Delta t$, а также величины M_k^*, M_y^*, M_z^* .

Далее процесс повторяется для следующего шага.

Обсуждение результатов. С целью контроля достоверности полученного уравнения и разработанной методики была решена тестовая задача для полимерной консольной балки из ПВХ, к которой приложена сила F с эксцентриситетом e (рис. 2).

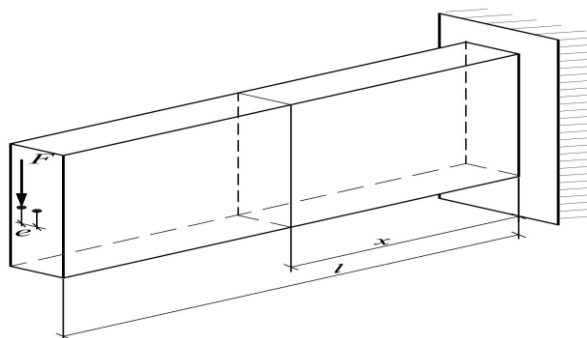


Рис.2. Расчетная схема
Fig.2. Design scheme

В качестве закона ползучести использовалось обобщенное уравнение Максвелла-Гуревича, имеющее вид:

$$\frac{\partial \varepsilon_{ij}^*}{\partial t} = \frac{f_{ij}^*}{\eta^*}, \quad i = (x, y, z), j = (x, y, z), \quad (20)$$

где ε_{ij}^* – деформации ползучести, f_{ij}^* – функции напряжений, η^* – релаксационная вязкость.

$$f_{ij}^* = \frac{3}{2}(\sigma_{ij} - p\delta_{ij}) - E_\infty \varepsilon_{ij}^*; \quad \frac{1}{\eta^*} = \frac{1}{\eta_0^*} \exp\left(\frac{|f_{\max}^*|}{m^*}\right). \quad (21)$$

В работе [11] для сжатых стержней, материал которых подчиняется нелинейному уравнению Максвелла-Гуревича вводится понятие длительной критической нагрузки.

При определении ее величины в выражении для мгновенной критической силы модуль упругости E заменяется на длительный модуль деформации $E_{дл}$.

В случае учета только одного члена спектра времен релаксации полимера выражение для длительного модуля $E_{дл}$ принимает вид:

$$E_{дл} = \frac{E \cdot E_\infty}{E + E_\infty}. \quad (22)$$

Характер роста перемещений сжатого стержня с начальной погибью при ползучести зависит от того, в каком интервале находится величина сжимающей силы. Если она меньше длительной критической $F_{дл}$, то ползучесть носит ограниченный характер, и потеря устойчивости не происходит.

При $F = F_{дл}$ рост перемещений происходит с постоянной скоростью, а если же $F > F_{дл}$ то скорость роста перемещений во времени возрастает. При $F \geq F_{дл}$ можно условно определить критическое время, ограничив величину максимального перемещения, либо скорость роста прогибов.

Для идеальной упругой балки потеря устойчивости плоской формы деформирования происходит при следующей величине критической силы [12]:

$$F_{кр} = \frac{4.01}{l^2} \sqrt{GI_k EI_z}. \quad (23)$$

Была введена величина длительной критической нагрузки по формуле:

$$F_{\text{дл}} = \frac{4.01}{l^2} \sqrt{G_{\text{дл}} I_k E_{\text{дл}} I_z}, \quad (24)$$

где $G_{\text{дл}} = \frac{G \cdot G_{\infty}}{G + G_{\infty}}$, $G_{\infty} = E_{\infty}/3$.

Исследовалось поведение балки при $F < F_{\text{дл}}$, $F = F_{\text{дл}}$ и $F > F_{\text{дл}}$.

Исходные данные принимались следующие: $b = 1$ см, $h = 10$ см, $E = 1480$ МПа, $E_{\infty} = 5990$ МПа, $\eta_0^* = 9.04 \cdot 10^5$ МПа · мин, $m^* = 12.6$ МПа, $\nu = 0.3$, $e = 0.01$ см.

Длительная критическая сила для рассматриваемой балки составляет $F_{\text{дл}} = 0.0465$ кН.

На рис.3 представлены графики изменения во времени максимальной величины угла закручивания при трех значениях нагрузки ($F = 0.044$ кН $< F_{\text{дл}}$, $F = 0.0465$ кН $= F_{\text{дл}}$ и $F = 0.048$ кН $> F_{\text{дл}}$).

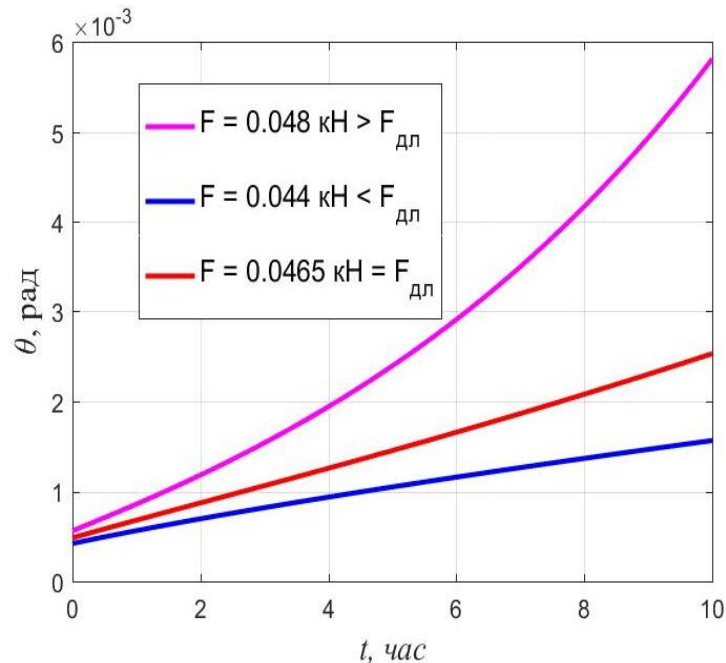


Рис.3. Изменение во времени максимального угла закручивания при различных величинах силы F

Fig.3. The change in time of the maximum angle of twisting at different values of the force F

Из рис. 3 видно, что, как и для сжатых стержней, при нагрузке меньше длительной критической скорость роста перемещений во времени затухает. При $F = F_{\text{дл}}$ перемещения растут с постоянной скоростью, и при $F > F_{\text{дл}}$ скорость роста перемещений возрастает во времени. Полученные результаты подтверждают достоверность методики.

Вывод. Получено универсальное разрешающее уравнение для расчета на устойчивость плоской формы изгиба балок прямоугольного сечения, подходящее для произвольных законов ползучести и позволяющее учесть переменную жесткость, а также начальные несовершенства в виде начальной погиби, начального угла закручивания и эксцентриситета приложения нагрузки.

Исследовано явление бокового выпучивания балок при ползучести на примере консольной полимерной балки.

Введена величина длительной критической нагрузки и установлена аналогия с задачами устойчивости сжатых стержней при ползучести.

Библиографический список:

1. Карамышева, А.А. Расчет на устойчивость плоской формы деформирования односкатной балки / А.А. Карамышева, Н.И. Никора, С.Б. Языев // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2015. С. 32-35.

2. Карамышева, А.А. Расчет деревянных балок переменного сечения на устойчивость плоской формы изгиба при проектировании уникальных зданий и сооружений / А.А. Карамышева // Сборник статей II строительной международной студенческой школы-семинара института ПГС «Проблемы проектирования и строительства высотных, уникальных зданий и сооружений». – Ростов н/Д: «Каллиграф», 2016. – С. 44-48.
3. Карамышева, А.А. Выпучивание двухскатной балки при чистом изгибе / А.А. Карамышева, С.Б. Языев, А.Е. Дудник // Актуальные проблемы технических наук в России и за рубежом. Сборник материалов международной научно-практической конференции. – Уфа: Аэтерна, 2015. – С. 35-37.
4. Карамышева, А.А. Расчет на устойчивость плоской формы изгиба балок переменной жесткости / А. А. Карамышева, С. Б. Языева, А. С. Чепурненко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. — 2016. — № 1 (186). — С. 95-98.
5. Карамышева, А.А. Устойчивость плоской формы изгиба односкатной дощатоклееной балки / А.А. Карамышева, А.С. Чепурненко, Б.М. Языев // Научное обозрение. — 2016. — № 7. — С. 25-27.
6. Чепурненко, А. С. Численный расчет балок прямоугольного поперечного сечения на устойчивость плоской формы изгиба / А. С. Чепурненко, В. В. Ульяновская, Д. А. Высоковский, И. М. Зотов // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №2. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4854>
7. Chepurnenko, A.S. Calculation of wooden beams on the stability of a flat bending shape enhancement / A. S. Chepurnenko, V.V. Ulianskaya, S.B. Yazyev, I.M. Zotov // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 196. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_01003
8. Ищенко, А.В. Энергетический метод в расчетах балок прямоугольного поперечного сечения при боковом выпучивании / А.В. Ищенко, И.М. Зотов // Инженерный вестник Дона. – 2019. – №1. – URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5583>
9. Karamisheva, A.A. Calculation of Plane Bending Stability of Beams with Variable Stiffness / A.A. Karamisheva, S.B. Yazyev, A.A. Avakov // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. pp. 1872-1877.
10. Andreev, V.I. Free Torsion of Viscoelastic Rod with Non-circular Cross-section / V.I. Andreev, A.S. Chepurnenko, B.M. Jazyev // Procedia Engineering. 2016. Vol.165. pp. 1147–1151.
11. Никора, Н.И. Определение длительных критических нагрузок для сжатых полимерных стержней при нелинейной ползучести / Н. И. Никора, А. С. Чепурненко, С. В. Литвинов // Инженерный вестник Дона. 2015. № 1. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796.
12. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем. / А.С. Вольмир. М.: Наука, 1975. 984 с.

References:

1. Karamysheva, A.A. Raschet na ustoychivost' ploskoy formy deformirovaniya odnoskatnoy balki / A.A. Karamysheva, N.I. Nikora, S.B. Yazyev // Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Ufa: Aeterna, 2015. – S. 32-35. [Karamysheva, A.A. Calculation of the stability of the flat form of deformation of a single-beam beam / A.A. Karamysheva, N.I. Nikora, S.B. Yazyev // Actual problems of technical sciences in Russia and abroad. Collection of materials of the international scientific-practical conference. - Ufa: Aethern, 2015. - p. 32-35. (In Russ)]
2. Karamysheva, A.A. Raschet derevyannykh balok peremennogo secheniya na ustoychivost' ploskoy formy izgiba pri proyektirovaniy unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy / A.A. Karamysheva // Sbornik statey II stroitel'noy mezhdunarodnoy studencheskoy shkoly-seminara instituta PGS «Problemy proyektirovaniya i stroitel'stva vysotnykh, unikal'nykh zdaniy i sooruzheniy». – Rostov n/D: «Kalligraf», 2016. – S. 44-48. [Karamysheva, A.A. Calculation of wooden beams of variable cross section for the stability of the flat shape of the bend when designing unique buildings and structures / A.A. Karamysheva // Collection of articles of the II Construction International Student School-Seminar of the Institute of Industrial and Civil Engineering “Problems of the design and construction of high-rise, unique buildings and structures”. - Rostov n / a: “Calligrapher”, 2016. - p. 44-48. (In Russ)]
3. Karamysheva, A.A. Vypuchivaniye dvukhskatnoy balki pri chistom izgibe / A.A. Karamysheva, S.B. Yazyev, A.Ye. Dudnik // Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Ufa: Aeterna, 2015. – S. 35-37. Karamysheva, A.A. Vypuchivaniye dvukhskatnoy balki pri chistom izgibe / A.A. Karamysheva, S.B. Yazyev, A.Ye. Dudnik // Aktual'nyye problemy tekhnicheskikh nauk v Rossii i za rubezhom. Sbornik materialov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. – Ufa: Aeterna, 2015. – S. 35-37. [Karamysheva, A.A. Buoyancy of a double-slope beam with a pure bend / A.A. Karamysheva, S.B. Yazyev, A.E. Dudnik // Actual Problems of Technical Sciences in Russia and Abroad. Collection of materials of the international scientific-practical conference. - Ufa: Aethern, 2015. - p. 35-37. (In Russ)]
4. Karamysheva, A.A. Raschet na ustoychivost' ploskoy formy izgiba balok peremennoy zhestkosti / A. A. Karamysheva, S. B. Yazyeva, A. S. Chepurnenko // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskiye nauki. — 2016. — № 1 (186). — S. 95-98. [Karamysheva, A.A. Calculation of the stability of the flat shape of bending of beams of variable stiffness / A. A. Karamysheva, S. B. Yazyeva, A. S. Chepurnenko // News of higher educational institutions. North Caucasus region. Series: Engineering. - 2016. - № 1 (186). - pp. 95-98. (In Russ)]
5. Karamysheva, A.A. Ustoychivost' ploskoy formy izgiba odnoskatnoy doshatokleyenoy balki / A.A. Karamysheva, A.S. Chepurnenko, B.M. Yazyev // Nauchnoye obozreniye. — 2016. — № 7. — S. 25-27 [Karamysheva, A.A. Stability

- of a flat form of bending of a single-sided glue-beam / A.A. Karamysheva, A.S. Chepurnenko, B.M. Yazyev // Scientific Review. - 2016. - № 7. - p. 25-27. (In Russ)]
6. Chepurnenko, A. S. Chislennyi raschet balok pryamougol'nogo poperechnogo secheniya na ustoychivost' ploskoy formy izgiba / A. S. Chepurnenko, V. V. Ul'yanskaya, D. A. Vysokovskiy, I. M. Zotov // In-zhenernyy vestnik Dona. - 2018. - №2. - URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4854> [Chepurnenko, A. S. Numerical calculation of rectangular cross-section beams on the stability of a flat bend / A. S. Chepurnenko, V. V. Ulianskaya, D. A. Vysokovsky, I. M. Zotov // In-Donor Bulletin. 2018. №2. URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/N2y2018/4854>(In Russ)]
7. Chepurnenko, A.S. Calculation of wooden beams on the stability of a flat bending shape enhancement / A. S. Chepurnenko, V.V. Ulianskaya, S.B. Yazyev, I.M. Zotov // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_01003/mateconf_rsp2018_01003.html Chepurnenko, A.S. A. S. Chepurnenko, V.V. Ulianskaya, S.B. Yazyev, I.M. Zotov // MATEC Web of Conferences. 2018. Vol. 196. URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/abs/2018/55/mateconf_rsp2018_01003/mateconf_rsp2018_01003.html (In Russ)]
8. Ishchenko, A.V. Energeticheskiy metod v raschetakh balok pryamougol'nogo poperechnogo secheniya pri bo-kovom vypuchivani / A.V. Ishchenko, I.M. Zotov // Inzhenernyy vestnik Dona. - 2019. - №1. - URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5583> [Ischenko, A.V. Energy method in calculations of rectangular cross-section beams with side bulging / A.V. Ischenko, I.M. Zotov // Engineering Herald of the Don. - 2019. - №1. - URL: <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2019/5583>(In Russ)]
9. Karamisheva, A.A. Calculation of Plane Bending Stability of Beams with Variable Stiffness / A.A. Kar-amisheva, S.B. Yazyev, A.A. Avakov // Procedures Engineering. - 2016. - Vol. 150. - Pp. 1872-1877.
10. Andreev, V.I. Free Torsion of Viscoelastic Rod with Non-circular Cross-section / V.I. Andreev, A.S. Chepurnenko, B.M. Jazyev // Procedia Engineering. - 2016. - Vol.165. Pp. 1147–1151.
11. Nikora, N.I. Opredeleniye dlitel'nykh kriticheskikh nagruzok dlya szhatykh polimernykh sterzhney pri nelineynoy polzuchesti / N. I. Nikora, A. S. Chepurnenko, S. V. Litvinov // Inzhenernyy vestnik Dona. — 2015. — № 1. —URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796. [Nikora, N.I. Determination of long-term critical loads for compressed polymer rods with nonlinear creep / N.I. Nikora, A.S. Chepurnenko, S.V. Litvinov // Dona Engineering Bulletin. 2015. № 1.URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1p2y2015/2796.
12. Vol'mir, A. S. Ustoychivost' deformiruyemykh sistem. / A.S. Vol'mir. – M.: Nauka, 1975. – 984 s. [Volmir, A.S. Stability of deformable systems. / A.S. Volmir. - M.: Science, 1975. 984 p.1. (In Russ)]

Сведения об авторах:

Зотов Иван Михайлович – аспирант кафедры «Сопротивление материалов».

Чепурненко Антон Сергеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Сопротивление материалов».

Языев Сердар Батырович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Техническая механика».

Information about authors:

Ivan M. Zotov - Postgraduate Student, Department "Strength of Materials".

Anton S. Chepurnenko - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department "Strength of Materials".

Serdar B. Yazyev - Cand. Sc. (Technical), Assoc. Prof., Department "Technical mechanics".

Конфликт интересов.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.02.2019.

Принята в печать 27.03.2019.

Conflict of interest.

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.02.2019.

Accepted for publication 27.03.2019.