УДК 539.374
Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-25-32

Для цитирования: Сенашов С. И., Савостьянова И. Л., Яхно А. Н. Изгиб композитного бруса // Сибирский аэрокосмический журнал. 2024. Т. 25, № 1. С. 25–32. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-25-32.

For citation: Senashov S. I., Savostyanova I. L., Yakhno A. N. [Bending of composite timber]. *Siberian Aerospace Journal.* 2024, Vol. 25, No. 1, P. 25–32. Doi: 10.31772/2712-8970-2024-25-1-25-32.

Изгиб композитного бруса

С. И. Сенашов[1], И. Л. Савостьянова[1*], А. Н. Яхно[2]

[1]Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева
Российская Федерация, 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31
[2]Университетский центр CUCEI Университета Гвадалахары
Мексика, 44000, Халиско, Гвадалахара, просп. Хуарес, 976
[*]E-mail: ruppa@inbox.ru

Композиционные материалы широко используются практически во всех сферах науки, техники, без них современная жизнь не мыслима. Механика деформируемого твердого тела сформировалась и окрепла как наука на изучении материалов, используемых в 19 и 20 вв. Композиционные материалы потребовали новых способов как теоретического, так и экспериментального изучения. Особой проблемой стало определение напряжений и деформаций, возникающих в местах контакта матрицы с волокнами. Большую роль в современной технике играют композиты с пластической матрицей. Эти материалы успешно справляются с трещинообразованием и существенно замедляют рост трещин. В настоящей статье решена задача о напряженном состоянии композиционного бруса с упруго-пластической матрицей и упругими волокнами, расположенными вдоль оси бруса. Предполагается, что в зоне контакта матрицы с волокнами, по модели Ю. Н. Работнова, реализуется постоянное касательное напряжение, меньшее, чем предел текучести волокна. Один конец бруса закреплен, а на второй – действует постоянная сила, приложенная к центру тяжести, совпадающему с началом координат. Предполагается, что на свободной границе бруса и в местах контакта бруса с волокнами напряжения достигают предела пластичности. Задача решена с помощью законов сохранения. Это позволяет свести нахождение напряженного состояния в произвольной точке сечения к вычислению интегралов по внешней границе бруса и границам матрицы и волокон.

Ключевые слова: композитный брус, напряженное состояние, законы сохранения дифференциальных уравнений.

Bending of composite timber

S. I. Senashov[1], I. L. Savostyanova[1*], A. N. Yakhno[2]

[1]Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
31, Krasnoyarskii rabochii prospekt, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation
[2]Department of Mathematics, CUCEI, University of Guadalajara
976, Juárez Av., Colonia Centro, C.P. 44100, Guadalajara, Jalisco, 44000, Mexico
[*]E-mail: ruppa@inbox.ru

Technologies and production widely use composite materials now. "Mechanics of deformable solids" was formed as a science based on the study of materials used in the 19th and 20th centuries. Modern composite materials require new theoretical and experimental studies. Determining the stresses and deforma-

tions that occur at the points of contact of the matrix with the fibers is a special problem. Composites with a plastic matrix play an important role in modern technology. These materials successfully cope with cracking and significantly slow down the growth of cracks. In this article, the problem of the stress state of a composite beam with an elastic-plastic matrix and elastic fibers located along the axis of the beam is solved. It is assumed that in the zone of contact of the matrix with the fibers, according to the model of Yu. N. Worknov, a constant tangential stress is realized, less than the yield strength of the fiber. One end of the beam is fixed, and a constant force applied to the center of gravity coinciding with the origin of coordinates acts on the second. It is assumed that at the free boundary of the beam and at the points of contact of the beam with the fibers, the stresses reach the plasticity limit. The problem is solved with the help of conservation laws. This makes it possible to find the stress state at an arbitrary point of the section as a calculation of integrals along the outer boundary of the beam and the boundaries of the matrix and fibers.

Keywords: composite beam, stress state, conservation laws of differential equations.

Введение

В настоящее время большое внимание уделяется всестороннему исследованию композитных материалов. Так, в [1] разработана многослойная броня – алюмооксидная керамика (тканый материал), армированная эпоксидной смолой и алюминиевым сплавом. В [2] исследованы колебания композитной балки из функционально-градиентного в двух направлениях материала, армированного углеродными нанотрубками. В работе [3] определена и сопоставлена эффективность различных схем облицовки пластины композитными покрытиями. В [4] исследована устойчивость подкрепленного отсека фюзеляжа самолета, выполненного из композиционного материала, при чистом изгибе и нагружении внутренним давлением. В [5] проведены исследования стойкости формируемого композитного материала при высокоскоростном соударении. В [6] приводится математическая постановка задачи о вынужденных установившихся и собственных колебаниях рассматриваемых смарт-систем, а также результаты численных расчетов, из которых следует, что графеновые композиты могут быть использованы для дополнительного демпфирования колебаний смарт-структур на основе пьезоэлементов. В работе [7] на основе метода конечных элементов разработан вычислительный алгоритм для решения ограниченного класса задач об изгибе композитных пластин, армированных системами однонаправленных высокопрочных волокон. Разработана модель динамического деформирования и разрушения композитных материалов, в которой учитывается нелинейность диаграмм ударного нагружения с упрочнением, зависящего от скорости деформирования [8].

В [9] Ю. Н. Работнов предложил модель композитного материала с упруго-пластическим связующим и упругими волокнами. При этом между волокнами и связующим, при нагружении, действует постоянное касательное напряжение. На основе этой модели в предлагаемой статье рассмотрено напряженное состояние бруса, изготовленного из композиционных материалов. Задача решена с помощью законов сохранения, построенных для системы дифференциальных уравнений, описывающих напряженное состояние бруса. Методику построения законов сохранения можно найти в [10; 11]. Законы сохранения позволяют эффективно решать краевые задачи для ряда уравнений механики деформируемого твердого тела. Примеры решения таких задач можно найти в [12–15].

Постановка задачи

Рассмотрим брус, изготовленный из упруго пластического материала, армированный n упругими волокнами. Один конец бруса закреплен в точке $z = 0$, на втором конце бруса при $z = l$ подвешен груз весом P в начале координат, который совпадает с центром тяжести сечения (рис. 1).

Матрица бруса имеет модуль упругости G и предел текучести при чистом сдвиге k_s. Волокна расположены вдоль оси бруса в произвольном порядке параллельно оси z. Каждое волокно имеет круглое сечение, центр волокна располагается в точке с координатами (x_i, y_i), радиус волокна равен R, модуль упругости G_i. Пределы текучести волокон превосходят предел текучести матрицы. Касательное напряжение между волокном и матрицей равно $\tau < k_s$.

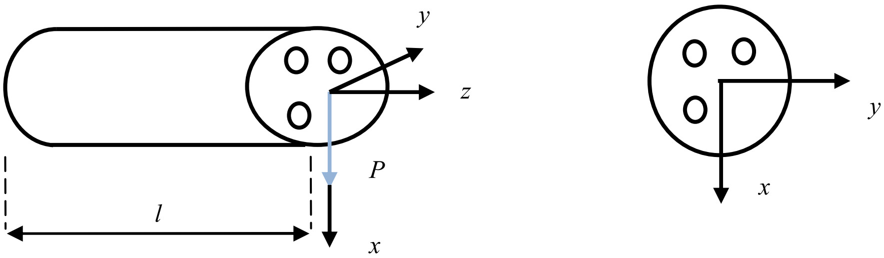

Рис. 1. Брус с волокнами с подвешенным грузом

Fig. 1. A fiber beam with a suspended load

Заданный процесс описывается уравнением равновесия и уравнениями совместности деформаций [13]:

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial y}=-\frac{Px}{I},\ \frac{\partial^2\tau_{xz}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\tau_{xz}}{\partial y^2}=-\frac{P}{(1+\nu)I},\ \ \frac{\partial^2\tau_{yz}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\tau_{yz}}{\partial y^2}=0.$$
$$\sigma_z=-\frac{P(l-z)x}{I},\quad I=\int_S x^2 ds. \tag{1}$$

Из двух последних уравнений (1), с учетом первого получаем

$$\frac{\partial\tau_{xz}}{\partial y}-\frac{\partial\tau_{yz}}{\partial x}=\frac{P\nu}{I(1+\nu)}y-2K, \tag{2}$$

где K – постоянная, являющаяся углом поворота объемного элемента бруса относительно оси z; $\tau_{xz},\tau_{yz},\sigma_z$ – компоненты тензора напряжений; S – поперечное сечение бруса; I – момент инерции относительно оси y; ν – коэффициент Пуассона.

Граничные условия на боковой поверхности бруса, свободной от напряжений и находящейся в пластическом состоянии, имеют вид

$$\tau_{xz}n_0+\tau_{yz}m_0=0,\quad \tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2=k^2=k_s^2-1/3\sigma_z^2,$$

где n_0,m_0 – компоненты вектора нормали к боковой поверхности, которые можно записать в виде

$$\tau_{xz}=\mp mk,\tau_{yz}=\pm nk. \tag{3}$$

На границе между волокном и матрицей выполняются условия

$$\tau_{xz}m_i-\tau_{yz}n_i=\tau,\ \tau_{xz}^2+\tau_{yz}^2=k^2,$$

где n_i,m_i – компоненты вектора нормали к боковой поверхности *i*-го волокна, которые запишем в виде

$$\tau_{xz}=m_i\tau\pm n_i\sqrt{k^2-\tau^2},\ \tau_{yz}=n_i\tau\mp m_i\sqrt{k^2-\tau^2}. \tag{4}$$

Далее в формулах (3)–(4) выбирается верхний знак.

Законы сохранения уравнений (1)–(2)

Для удобства дальнейших вычислений введем следующие обозначения:

$$\tau_{xz}=u,\tau_{yz}=v.$$

Тогда задача (1)–(4) запишется так:

$$
\begin{gathered}
F_1 = u_x - v_y + Px / I = 0, \\
F_2 = u_y - v_x - \frac{P\nu}{(1+\nu)} y + 2K = 0,
\end{gathered} \tag{5}
$$

на боковой поверхности:

$$u = -mk, v = nk,$$

на границе волокна и матрицы:

$$u = m_i\tau + n_i\sqrt{k^2 - \tau^2}, \quad v = n_i\tau - m_i\sqrt{k^2 - \tau^2}.$$

Определение. Законом сохранения для системы уравнений (5) назовем выражение вида

$$A_x(x, y, u, v) + B_y(x, y, u, v) = \omega_1 F_1 + \omega_2 F_2, \tag{6}$$

где ω_1, ω_2 – некоторые линейные операторы, одновременно не равные тождественно нулю.

Более подробно с техникой вычисления законов сохранения и их использования можно ознакомиться в [3–5].

Пусть

$$A = \alpha^1 u + \beta^1 v + \gamma^1,\ B = \alpha^2 u + \beta^2 v + \gamma^2, \tag{7}$$

где $\alpha^i, \beta^i, \gamma^i$ – функции только от x, y.

Подставляя (7) в (6) получаем

$$\alpha_x^1 + \alpha_y^2 = 0,\ \beta_x^1 + \beta_y^2 = 0,\ \alpha^1 = \omega_1,\ \beta^1 = -\omega_2,\ \alpha^2 = \omega_2,\ \beta^2 = \omega_1,$$

$$\gamma_x^1 + \gamma_y^2 = -\alpha^1 Px / I + \beta^1[2K - P\nu y / (I(1+\nu))].$$

Отсюда следует

$$
\begin{gathered}
\alpha_x^1 - \beta_y^1 = 0, \quad \beta_x^1 + \alpha_y^1 = 0, \\
\gamma_x^1 + \gamma_y^2 = -\alpha^1 Px / I + \beta^1[2K - P\nu y / (I(1+\nu))].
\end{gathered} \tag{8}
$$

Рассмотрим для системы уравнений (8) два решения, имеющие особенности в произвольной точке x_0, y_0 сечения:

1)
$$
\begin{gathered}
\alpha^1 = \frac{x - x_0}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2},\ \beta^1 = -\frac{y - y_0}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}, \\
\gamma^1 = 0, \quad \gamma^2 = -\frac{Px}{I}\operatorname{arctg}\frac{y-y_0}{x-x_0} + \frac{P\nu}{I(1+\nu)}(y - y_0 + (\frac{y_0}{x-x_0} + x - x_0)\operatorname{arctg}\frac{y-y_0}{x-x_0} + \\
+\frac{1}{2}\ln((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2) - K\ln((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2),
\end{gathered} \tag{9}
$$

2)
$$
\begin{gathered}
\alpha_*^1 = \frac{y - y_0}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2},\ \beta_*^1 = \frac{x - x_0}{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}, \\
\gamma_*^1 = 0, \quad \gamma_*^2 = 2K\operatorname{arctg}\frac{y-y_0}{x-x_0} - \frac{P\nu}{I(1+\nu)}[y_0\operatorname{arctg}\frac{y-y_0}{x-x_0} + \frac{x-x_0}{2}\ln((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2)] - \\
-\frac{Px^2}{2I}\ln((x-x_0)^2 + (y-y_0)^2),
\end{gathered} \tag{10}
$$

где x_0, y_0 – постоянные.

Вычисление напряженного состояния в точке x_0, y_0

Пусть (x_0, y_0) – произвольная точка, принадлежащая связующему, и пусть в этой точке сохраняющийся ток имеет особенность вида (9) или (10). Тогда из (6) следует

$$\iint\limits_S (A_x + B_y)dxdy = \oint\limits_{\Gamma_0} Ady - Bdx - \sum_{i=1}^{n} \oint\limits_{\Gamma_i} Ady - Bdx - \oint\limits_{\varepsilon} Ady - Bdx = 0, \qquad (11)$$

где ε окружность $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = \varepsilon^2$ (рис. 2).

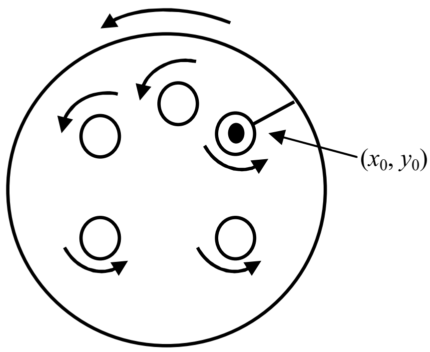

Рис. 2. Вычисление напряженного состояния в точке x_0, y_0

Fig. 2. Calculation of the stress state at a point x_0, y_0

Рассмотрим решение (9), полагая $x - x_0 = \varepsilon\cos\varphi, y - y_0 = \varepsilon\sin\varphi$, тогда из (11) с учетом (9), при $\varepsilon \to 0$, получаем

$$\begin{aligned}2\pi\tau_{xz}(x_0, y_0) = \oint\limits_{\Gamma_0} &(m_0 k \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - n_0 k \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2})dy - \\ &-(m_0 k \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + n_0 k \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y)^2} + \gamma^2)dx + \\ &+\sum_{i=1}^{n} \oint\limits_{\Gamma_i} (\frac{(m_i\tau + n_i\sqrt{k^2 - \tau^2})(x - x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - \frac{(-n_i\tau + m_i\sqrt{k^2 - \tau^2})(y - y_0)}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2})dy - \\ &-((m_i\tau + n_i\sqrt{k^2 - \tau^2})\frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + \\ &+(n_i\tau + m_i\sqrt{k^2 - \tau^2})\frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y)^2} + \gamma^2)dx.\end{aligned} \qquad (12)$$

Рассмотрим другое решение уравнений (8) вида (9).

Почти дословно повторяя предыдущие рассуждения с решением (12), получаем

$$\begin{aligned}2\pi\tau_{23}(x_0, y_0) = \oint\limits_{\Gamma_0} &(m_0 k \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + n_0 k \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2})dy - \\ &-(-m_0 k \frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + n_0 k \frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y)^2} + \gamma_*^2))dx + \\ &+\sum_{i=1}^{n} \oint\limits_{\Gamma_i} (\frac{(m_i\tau + n_i\sqrt{k^2 - \tau^2})(y - y_0)}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + \frac{(-n_i\tau + m_i\sqrt{k^2 - \tau^2})(x - x_0)}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2})dy - \\ -(-(m_i\tau + n_i\sqrt{k^2 - \tau^2})&\frac{x - x_0}{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} + (n_i\tau + m_i\sqrt{k^2 - \tau^2})\frac{y - y_0}{(x - x_0)^2 + (y - y)^2} + \gamma_*^2)dx.\end{aligned} \qquad (13)$$

Заключение

Полученные формулы позволяют вычислить напряженное состояние в любой точке связующего материала. Те точки, где $\tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 = k^2$, будут находиться в пластическом состоянии, остальные точки среды, а также волокна, будут оставаться упругими. Предложенный метод решения позволяет построить упруго-пластическую границу в изгибаемом композитном брусе и тем самым оценить его несущую способность. Многообразие композитов [14 – 16] и их огромная практическая важность позволяют надеяться, что предложенная авторами методика позволит оценивать прочность конструкций изготовленных из композитов.

Библиографические ссылки

1. Ахмед П. С., Абед М. С., Салим И. А. Экспериментальное исследование и численное моделирование баллистического воздействия на гибридный композит (оксид алюминия – тканый материал – эпоксидная смола – алюминий), используемый при изготовлении бронежилета // ПМТФ. 2023. № 4. С. 3–13.

2. Пан М., Чжоу С. М., Ху Б. Л., Чзан Ю. Ц. Свободные колебания композитной балки из функционально-градиентного в двух направлениях материала, армированной углеродными нанотрубками // ПМТФ. 2023. № 5. С. 166–178.

3. Кирпичников В. Ю., Кощеев А. П., Сятковский А. И. Экспериментальное исследование эффективности армированных вибропоглощающих покрытий // ПМТФ. 2022. № 1. С. 65–70.

4. Железнов Л. П., Серьезнов А. Н. Исследование нелинейного деформирования и устойчивости композитной оболочки при чистом изгибе и внутреннем давлении // ПМТФ. 2022. № 2. С. 207–216.

5. Голышев А. А., Долгова С. В. Влияние керамического волокна SiC в металломатричном композите на его стойкость при высокоскоростном нагружении // ПМТФ. 2022. № 6. С. 145–149.

6. Матвеенко В. П., Ошмарин Д. А., Юрлова Н. А. Использование электропроводящих композиционных материалов для дополнительного демпфирования смарт-систем на основе пьезоэлементов // ПМТФ. 2021. № 5. С. 45–57.

7. Петраков И. Е., Садовский В. М., Садовская О. В. Анализ изгиба композитных пластин с учетом различия сопротивлений растяжению и сжатию // ПМТФ. 2021. № 1. С. 172–183.

8. Федоренко А. Н., Федулов Б. Н., Ломакин Е. В. Моделирование ударного воздействия на демпфирующие элементы, изготовленные из композитных материалов // ПМТФ. 2021. № 1. С. 100–107.

9. Работнов Ю. Н. Механика деформируемого твердого тела. Москва : Наука, 1979. 743 с.

10. Vinogradov A. M. Local symmetries and conservation laws // Acta Appl. Math. 1984. No. 2. P. 21–78.

11. Senashov S. I., Vinogradov A. M. Symmetries and conservation laws of 2-dimensional ideal plasticity // Proc. Edinburg Math. Soc. 1988. No. 31. P. 415–439.

12. Senashov S. I., Savostyanova I. L. Using conservation laws to solve boundary value problems of the Moisila-Teodorescu system // J. Appl. Industr. Math. 2022. Vol. 25, No. 2.P. 101–109.

13. Gomonova O. V., Senashov S. I. Determining elastic and plastic deformation regions in a problem of unixaxial tension of a plate weakened by holes // J. Appl. Mech. Tech. Phys. 2021. Vol. 62, No. 1, P. 157–163.

14. Senashov S. I., Savostyanova I. L., Cherepanova O. N. Elastoplastic bending of the console with transverse force // J. of the Siberian Federal University. Math. and Phys. 2019. Vol. 12, No. 5, P. 637–643.

15. Сенашов С. И., Савостьянова И. Л. Об упругом кручении вокруг трех осей // Сибирский журнал индустриальной математики. 2021. Т. 24, № 1. С. 120–125.

16. Новацкий В. Теория упругости. М. : Мир, 1975. 872 с.

17. Милейко С. Т. Антони Келли и композиты сегодня. Ч. 2. Композиты с металлической матрицей // Композиты и наноструктуры. 2021. В. 1, № 3–4 (51–52). С. 59–107.

18. Милейко С. Т. Композиты и наноструктуры // Композиты и наноструктуры. 2009. Вып. 1. С. 6– 37.

19. Келли А. Инженерный триумф углеводородов // Композиты и наноструктуры. 2009. Вып. 1. С. 38–49.

References

1. Ahmed P. S., Abed M. S., Salim I. A. [Experimental investigation and numerical modeling of ballistic effects on a hybrid composite (aluminum oxide – woven material – epoxy resin – aluminum) used in the manufacture of body armor]. *PMTF*. 2023, No. 4, P. 3–13 (In Russ.).

2. Pan M., Zhou S. M., Hu B. L., Chzan Yu. Ts. [Free vibrations of a composite beam made of a functionally gradient in two directions material reinforced with carbon nanotubes]. *PMTF*. 2023, No. 5, P. 166–178 (In Russ.).

3. Kirpichnikov V. Yu., Kosheev A. P., Syatkovsky A. I. [Experimental study of the effectiveness of reinforced vibration-absorbing coatings]. *PMTF*. 2022, No. 1, P. 65–70 (In Russ.).

4. Zheleznov L. P., Serebrinov A. N. [Investigation of nonlinear deformation and stability of a composite shell under pure bending and internal pressure]. *PMTF*. 2022, No. 2, P. 207–216 (In Russ.).

5. Golyshev A. A., Dolgova S. V. [The influence of SiC ceramic fiber in a metal matrix composite on its resistance under high-speed loading]. *PMTF*. 2022, No. 6, P. 145–149 (In Russ.).

6. Matveenko V. P., Oshmarin D. A., Yurlova N. A. [The use of electrically conductive composite materials for additional damping of smart systems based on piezoelectric elements]. *PMTF*. 2021, No. 5, P. 45–57 (In Russ.).

7. Petrakov I. E., Sadovsky V. M., Sadovskaya O. V. [Bending analysis of composite plates with taking into account the differences in tensile and compressive resistances]. *PMTF*. 2021, No. 1, P. 172–183 (In Russ.).

8. Fedorenko A. N., Fedulov B. N., Lomakin E. V. [Modeling of impact on damping elements made of composite materials]. *PMTF*. 2021, No. 1, P. 100–107 (In Russ.).

9. Rabotnov Y. N. *Mekhanika deformiruemogo tverdogo tela* [Mechanics of a deformable solid]. Moscow, Nauka Publ., 1979, 743 p.

10. Vinogradov A. M. Local symmetries and conservation laws. *Acta Appl. Math*. 1984, No. 2, P. 21–78.

11. Senashov S. I., Vinogradov A. M. Symmetries and conservation laws of 2-dimensional ideal plasticity. *Proc. Edinburg Math. Soc*. 1988, No. 31, P. 415–439.

12. Senashov S. I., Savostyanova I. L. Using conservation laws to solve boundary value problems of the Moisila-Teodorescu system. *J. Appl. Industr. Math*. 2022, Vol. 25, No. 2, P. 101–109.

13. Gomonova O. V., Senashov S. I. Determining elastic and plastic deformation regions in a problem of unixaxial tension of a plate weakened by holes. *J. Appl. Mech. Tech. Phys*. 2021, Vol. 62, No. 1, P. 157–163.

14. Senashov S. I., Savostyanova I. L., Cherepanova O. N. Elastoplastic bending of the console with transverse force. *J. of the Siberian Federal University. Math. and Phys*. 2019, Vol. 12, No. 5, P. 637–643.

15. Senashov S. I., Savostyanova I. L. [On elastic torsion around three axes]. *Siberian Journal of Industrial Mathematics*. 2021, Vol. 24, No. 1, P. 120–125 (In Russ.).

16. Novatsky V. *Teoriya uprugosti* [Theory of elasticity]. Moscow, Mir Publ., 1975, 872 p.

17. Mileyko S.T. [Anthony Kelly and composites today. Part 2: composites with a metal matrix]. *Kompozity i nanostruktury*. 2021, Vol. 1, No. 3–4 (51–52), P. 59–107 (In Russ.).

18. Mileyko S. T. [Composites and nanostructures]. *Kompozity i nanostruktury*. 2009, Vol. 1, P. 6–37 (In Russ.).

19. Kelly A. [Engineering triumph of hydrocarbons]. *Kompozity i nanostruktury*. 2009, Vol. 1, P. 38–49 (In Russ.).

Сенашов Сергей Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: sen@sibsau.ru.

Савостьянова Ирина Леонидовна – кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационно-управляющих систем; Сибирский государственный университет науки и технологий имени академика М. Ф. Решетнева. E-mail: ruppa@inbox.ru.

Яхно Александр Николаевич – кандидат физико-математических наук, профессор математического факультета университетского центра CUCEI Университета Гвадалахары. E-mail: alexander.yakhno@cucei.udg.mx.

Senashov Sergey Ivanovich – Dr. Sc., Professor, Professor of the IES Department; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: sen@sibsau.ru.

Savostyanova Irina Leonidovna – Cand. Sc., Associate Professor of the IES Department; Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. E-mail: ruppa@inbox.ru.

Yakhno Alexander Nikolaevich – Cand. Sc., Department of Mathematics, CUCEI, University of Guadalajara, Mexico. E-mail: alexander.yakhno@cucei.udg.mx.