

## ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630.378, 539.3

*Ю. В. Лоскутов*

### ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ КОНЕЧНЫЙ ЭЛЕМЕНТ ДЛЯ РАСЧЁТА КОМПОЗИТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

*Выполненные в данной работе исследования позволяют решить для трубопроводного гидротранспорта лесопромышленного комплекса задачу разработки и применения научно обоснованных методов проектирования композитных конструкций. Для анализа плоского напряжённого состояния трубопроводов использованы метод конечных элементов (МКЭ) и подходы строительной механики. Представлен прямолинейный стержневой конечный элемент. Получены расчётные соотношения для коэффициентов матрицы жёсткости и вектора узловых сил конечного элемента (КЭ) тонкостенного трубопровода, изготовленного из волокнистого композита. Рассмотрено двухкомпонентное статическое нагружение, включающее действие температуры и внутреннего давления. Учитывается слоистая структура материала и анизотропия термоупругих свойств. Расчётные соотношения и математическая модель могут быть полезны при проектировании трубопроводов и пульпопроводов гидромеханизации, нефте- и газопроводов.*

**Ключевые слова:** механика композитов; полимерные композиционные материалы; прочность; жёсткость; МКЭ; трубопроводы; лесосплавные пути.

**Введение.** Трубопроводный транспорт получает широкое распространение в мировой экономике. В нефтяной и газовой промышленности по магистральным трубопроводам транспортируются миллионы кубометров сырья. В гидротехническом строительстве, в том числе и гидромелиорации по улучшению водных путей, перемещение водно-грунтовых смесей по пульпопроводам позволяет существенно улучшить механизацию производства [1, 2]. В связи с постепенным удалением мест измельчения древесины от потреби-

теля и ростом объёмов её потребления, трубопроводная транспортировка становится перспективным направлением в лесной отрасли [3]. На бумажных и картонных фабриках вторсырьё и полуфабрикаты подаются по напорным трубопроводам на размалывающие машины. Применяемый на канадских предприятиях трубопроводный гидротранспорт щепы на большие расстояния выявляет возможность перспективного способа доставки измельчённой древесины, являясь экономически оправданным.

При создании трубопроводов для гидротранспорта применяют различные материалы. Металлические трубопроводы и пульпопроводы используются с начала становления гидромеханизации и по настоящее время [2, 4]. Однако, в связи с большим весом, низкой износостойкостью, сложностью при монтаже, на замену им всё чаще приходят современные трубопроводы из полимерных композитных материалов (ПКМ).

Слоисто-волоконистая структура материала, армирование высокопрочными и высокомодульными волокнами и тонкие стенки обеспечивают достаточно эффективное сочетание прочности, жёсткости и трещиностойкости с относительно малым удельным весом. Следует учитывать, что распространёнными элементами современных силовых конструкций (ферм, рам, балок, валов, арок, труб, трубопроводов и т.д.) являются тонкостенные пространственные стержни.

Разработке теории и методов расчёта тонкостенных слоистых стержней посвящён ряд работ, например [5–7]. В [5] разрешающие уравнения строятся на базе общей теории многослойных анизотропных оболочек. В [7] для вывода расчётных соотношений применяются вариационно-матричные методы.

Широкое применение композиционных материалов в современных конструкциях, стремление максимально использовать их достоинства определяет актуальность разработки методов исследования деформирования и напряжённого состояния при проектировании многослойных труб и трубопроводов, в том числе применяемых в гидротранспорте лесной отрасли, поэтому одной из актуальных задач является задача расчёта трубопроводов из многослойных композитов.

**Целью** работы является разработка методики расчёта композитных трубопроводов гидротранспорта.

**Решаемые задачи:**

1) разработка конечно-элементной математической (МКЭ) модели деформирования под нагрузкой прямолинейных участков трубопроводов, изготовленных из ПКМ методом намотки;

2) вывод соотношений упругости, матрицы жёсткости, вектора узловых сил.

**Математическое моделирование.** Рассмотрим конечно-элементную модель: расчётные соотношения (матрицу жёсткости и вектор узловых сил) составим, используя традиционные подходы строительной механики стержневых систем.

На рис. 1 изображён прямолинейный конечный элемент (КЭ) как участок цилиндрической оболочки. Стенка оболочки образована путём перекрёстной спиральной намотки на оправку двух симметричных систем волокон (нитей или прядей). Волокна составляют с образующей цилиндра углы  $\pm \theta$ .

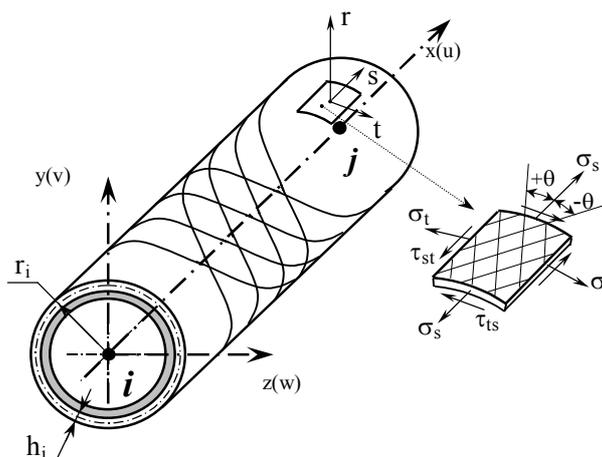


Рис. 1. Прямолинейная труба как многослойная цилиндрическая оболочка

Число слоёв принимаем  $2k+1$ . Внутренний слой (оправку) считаем однородным и изотропным, слои из ПКМ (монослои) – ортотропными и линейно упругими. Связи волокон и связующего, а также отдельных слоёв друг с другом предполагаем идеальными.

Используем правые ортогональные системы осей координат. Координаты 1, 2, 3 (естественные координаты) связываем с

осями упругой симметрии монослоя; координаты  $s, r, t$  – с его срединной поверхностью; координаты  $x, y, z$  – с осевой линией и поперечным сечением КЭ (рис. 1).

**Соотношения упругости.** Принимаем, что монослой «работает» в условиях плоского напряжённого состояния. В этом случае зависимость между деформациями и напряжениями для однонаправленного слоя имеет вид:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{12}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (1)$$

или в матричной форме:

$$\{\varepsilon_{12}\} = [S^0] \{\sigma_{12}\} + \{\alpha_{12}\} \Delta T. \quad (1')$$

Здесь  $\{\varepsilon_{12}\}$ ,  $\{\sigma_{12}\}$ ,  $\{\alpha_{12}\}$  – соответственно векторы деформаций, напряжений и коэффициентов температурного расширения;  $[S^0]$  – матрица податливости;  $\Delta T$  – изменение температуры;  $E_1, E_2, G_{12}, \nu_{12}, \nu_{21}, \alpha_1, \alpha_2$  – технические постоянные термоупругости (эффективные термоупругие постоянные). При этом  $\nu_{12}E_2 = \nu_{21}E_1$ .

Эффективные упругие константы определяются формулами [7]:

$$\begin{aligned} E_1 &= \psi E' + (1-\psi)E'', \\ E_2 &= E'E'' / [\psi E'' + (1-\psi)E'], \\ G_{12} &= G'G'' / [\psi G'' + (1-\psi)G'], \\ \nu_{12} &= \psi \nu' + (1-\psi)\nu'', \\ \nu_{21} &= \nu_{12}E_2/E_1. \end{aligned} \quad (2)$$

Формулы для эффективных коэффициентов температурного расширения имеют вид:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \psi \alpha' + (1-\psi)\alpha'', \\ \alpha_2 &= [\psi \alpha'E' + (1-\psi)\alpha''E''] / [\psi E' + (1-\psi)E'']. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь (\*)' и (\*)'' – характеристики волокна и матрицы соответственно,  $\psi$  – коэффициент армирования.

Соотношения, обратные (1), имеют вид:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}^0 & g_{12}^0 & 0 \\ g_{12}^0 & g_{22}^0 & 0 \\ 0 & 0 & g_{66}^0 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} - \begin{Bmatrix} \beta_1 \\ \beta_2 \\ 0 \end{Bmatrix} \Delta T \quad (4)$$

или  $\{\sigma_{12}\} = [G^0] \{\varepsilon_{12}\} - \{\beta_{12}\} \Delta T$ , где  $[G^0]$  – матрица жёсткости монослоя,  $\{\beta_{12}\}$  – вектор температурных напряжений. Коэффициенты матрицы  $[G^0]$  и вектора  $\{\beta_{12}\}$  связаны с техническими постоянными термоупругости следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} g_{11}^0 &= E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad g_{12}^0 = \nu_{21}E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \\ g_{22}^0 &= E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \quad g_{66}^0 = G_{12}, \\ g_{21}^0 &= g_{12}^0, \quad \beta_1 = (\alpha_1 + \nu_{21}\alpha_2)E_1 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}), \\ \beta_2 &= (\alpha_2 + \nu_{12}\alpha_1)E_2 / (1 - \nu_{12}\nu_{21}). \end{aligned}$$

Перепишем зависимости (1) и (4) из естественной системы координат 1, 2, 3 к цилиндрическим координатам  $s, r, t$ . Получим

$$\{\varepsilon_{st}\} = [S] \{\sigma_{st}\} + \{\alpha_{st}\} \Delta T, \quad (5)$$

$$\{\sigma_{st}\} = [G] \{\varepsilon_{st}\} - \{\beta_{st}\} \Delta T.$$

Преобразования поворота осей координат относительно нормали к поверхности имеют известный вид:

$$[S] = [L_1][S^0][L_1]^T, \quad [G] = [L_2][G^0][L_2]^T, \quad (6)$$

$$\{\alpha_{st}\} = [L_1] \{\alpha_{12}\}, \quad \{\beta_{st}\} = [L_2] \{\beta_{12}\}.$$

Здесь  $[L_1]$  и  $[L_2]$  – матрицы преобразований поворота:

$$\begin{aligned}
 [L_1] &= \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -mn \\ n^2 & m^2 & mn \\ 2mn & -2mn & m^2-n^2 \end{bmatrix}, \\
 [L_2] &= \begin{bmatrix} m^2 & n^2 & -2mn \\ n^2 & m^2 & 2mn \\ mn & -mn & m^2-n^2 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{7}$$

При этом  $m = \cos \theta$ ,  $n = \sin \theta$ . Индекс «т» обозначает операцию транспонирования матрицы.

Заметим, согласно (6), в произвольной системе координат  $s, r, t$  угловые деформации  $\gamma_{st}$  однонаправленного слоя получаютс я связанными с нормальными напряжениями  $\sigma_s$  и  $\sigma_t$ , а линейные деформации  $\varepsilon_s$  и  $\varepsilon_t$  – с касательными напряжениями  $\tau_{st}$ . В частном случае перекрёстной спиральной симметричной намотки для системы, составленной из двух монослоёв с углами  $\pm\theta$ , коэффициенты  $s_{16} = s_{26} = 0$ ,  $g_{16} = g_{26} = 0$ ,  $\alpha_{st} = 0$ ,  $\beta_{st} = 0$ . В результате указанные связи исчезают.

При напряжённом состоянии с компонентами:  $\sigma_s, \tau_{st}, \sigma_t = 0$  технические постоянные термоупругости ортотропного композита будут равны [9]:

$$\begin{aligned}
 E_s &= g_{11} - \frac{g_{12}^2}{g_{22}}, \quad E_t = g_{22} - \frac{g_{12}^2}{g_{11}}, \quad G_{st} = g_{66}, \\
 \nu_{st} &= \frac{g_{12}}{g_{22}}, \quad \alpha_s = \frac{\beta_s g_{22} - \beta_t g_{12}}{g_{11} g_{22} - g_{12}^2}, \\
 \alpha_t &= \frac{\beta_t g_{11} - \beta_s g_{12}}{g_{11} g_{22} - g_{12}^2}.
 \end{aligned} \tag{8}$$

**Матрица жёсткости.** Матрицу жёсткости КЭ представим в виде:

$$[C^{(n)}] = \begin{bmatrix} C_{II}^{(n)} & C_{IJ}^{(n)} \\ C_{JI}^{(n)} & C_{JJ}^{(n)} \end{bmatrix}, \tag{9}$$

где  $n$  – порядковый номер КЭ;  $i$  и  $j$  – номера узлов;  $[C_{ii}^{(n)}]$ ,  $[C_{ij}^{(n)}]$ ,  $[C_{ji}^{(n)}]$ ,  $[C_{jj}^{(n)}]$  – подматрицы жёсткости КЭ размера (6х6).

Подматрицу жёсткости  $[C_{ii}^{(n)}]$  определяем через подматрицу податливости КЭ –  $[C_{ii}^{(n)}]^{-1} = [\delta_{ii}^{(n)}]$ . Компоненты симметричной матрицы  $[\delta_{ii}^{(n)}]$  находим при помощи интегралов Мора. Тогда, для консольного КЭ (считаем узел  $j$  закреплён) получим [10]:

$$\begin{aligned}
 \delta_{11} &= \frac{l}{A_x}, \quad \delta_{22} = \frac{l^3}{3B_z} + k_y \frac{l}{A_y}, \\
 \delta_{26} &= -\frac{l}{2B_z}, \quad \delta_{33} = \frac{l^3}{3B_y} + k_z \frac{l}{A_z}, \\
 \delta_{35} &= \frac{l}{2B_y}, \quad \delta_{44} = \frac{l}{B_x}, \\
 \delta_{55} &= \frac{l}{B_y}, \quad \delta_{66} = \frac{l}{B_z}.
 \end{aligned} \tag{10}$$

Оставшиеся коэффициенты матрицы  $[\delta_{ii}^{(n)}]$  равняются нулю. В этом случае деформированное состояние КЭ определяется шестью независимыми обобщёнными координатами, образующими вектор обобщённых перемещений узла ( $i$ ),  $\{q_i\} = \{u_i \ v_i \ w_i \ \varphi_{xi} \ \varphi_{yi} \ \varphi_{zi}\}^T$ .

В формулах (10)  $A_x, A_y, A_z, B_x, B_y, B_z$  – это жёсткости поперечного сечения стержня на растяжение-сжатие, сдвиг, кручение и изгиб соответственно. При-

$$\begin{aligned}
 A_x &= \int_A E_s dA = 2\pi \sum_{i=1}^{k+1} (E_{si} h_i r_i), \\
 A_y = A_z &= \int_A G_{st} dA = 2\pi \sum_{i=1}^{k+1} (G_{sti} h_i r_i), \\
 B_x &= \int_A G_{st} r^2 dA = 2\pi \sum_{i=1}^{k+1} (G_{sti} h_i r_i^3), \\
 B_y = B_z &= \int_A E_s y^2 dA = \pi \sum_{i=1}^{k+1} (E_{si} h_i r_i^3),
 \end{aligned} \tag{11}$$

где безразмерные коэффициенты

$$k_y = k_z = \frac{A_y}{B_z^2} \int_A \frac{S_z^{*2} dA}{G_{st} b^2} = \frac{\pi A_y}{B_z^2} \sum_{i=1}^{k+1} \left( \frac{E_{si}^2 h_i r_i^5}{G_{sti}} \right) \quad (12)$$

учитывают неравномерное распределение по поперечному сечению касательных напряжений изгиба (определяются согласно [10] в результате осреднения энергий деформации сдвига). Здесь  $S_z^* = \int_{A^*} E_s y dA$  – упругостатический момент

части поперечного сечения  $A^*$ ;  $i$  – порядковый номер слоя;  $r_i, h_i$  – средний радиус и толщина слоя;  $l$  – длина КЭ.

Подматрицы жёсткости КЭ  $[C_{ji}^{(n)}]$  и  $[C_{ij}^{(n)}]$  находятся при помощи преобразований вида:

$$[C_{ji}^{(n)}] = -[Z^{(n)}][C_{ii}^{(n)}] \quad (13)$$

$$\text{и } [C_{ij}^{(n)}] = -[Z^{(n)}][C_{ij}^{(n)}],$$

где  $[Z^{(n)}]$  – матрица линейных преобразований [11].

**Вектор узловых сил.** Распределённые температурные и гидродинамические воздействия заменяем эквивалентной системой сосредоточенных узловых сил. Для этого используем основную систему метода перемещений: узловые силы в системе координат  $x, y, z$  (рис.1) находим как реакции узловых связей, взятые с обратным знаком,

$$\begin{Bmatrix} F_i^{(n)} \\ F_j^{(n)} \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} C_{ii}^{(n)} \\ C_{ji}^{(n)} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta_i^{(n)} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ R_j^{(n)} \end{Bmatrix}, \quad (14)$$

где  $\{F_i^{(n)}\}$  и  $\{F_j^{(n)}\}$  – шестикомпонентные векторы узловых сил;  $\{\Delta_i^{(n)}\}$  – вектор упругих перемещений узла  $i$  [12]:

$$\begin{Bmatrix} \Delta_i^{(n)} \end{Bmatrix} = \left( \varepsilon_\tau + \varepsilon_p + \varepsilon_{\tau_0} \right) \begin{Bmatrix} x^{(n)} \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

$$\begin{Bmatrix} x^{(n)} \end{Bmatrix} = l \begin{Bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{Bmatrix}^T.$$

Для трубы с тонкими стенками:

$$\varepsilon_{\tau_0} = \frac{\tau_0 l}{2A_x}, \quad \varepsilon_\tau = \Delta T \times$$

$$\times \left[ \frac{\sum_{i=1}^{k+1} (\beta_{Si} h_i) \sum_{i=1}^{k+1} (g_{22i} h_i) - \sum_{i=1}^{k+1} (\beta_{Ti} h_i) \sum_{i=1}^{k+1} (g_{12i} h_i)}{\sum_{i=1}^{k+1} (g_{11i} h_i) \sum_{i=1}^{k+1} (g_{22i} h_i) - \left( \sum_{i=1}^{k+1} (g_{12i} h_i) \right)^2} \right], \quad (16)$$

$$\varepsilon_p = \frac{R(p_m + \rho_{жс} v_m^2)}{2} \times$$

$$\times \left[ \frac{\sum_{i=1}^{k+1} (g_{22i} h_i) - 2 \sum_{i=1}^{k+1} (g_{12i} h_i)}{\sum_{i=1}^{k+1} (g_{11i} h_i) \sum_{i=1}^{k+1} (g_{22i} h_i) - \left( \sum_{i=1}^{k+1} (g_{12i} h_i) \right)^2} \right].$$

Здесь  $p_m$  и  $v_m$  – стационарные составляющие давления и скорости внутреннего потока;  $\rho_{жс}$  – плотность;  $\tau_0$  – интенсивность сил трения жидкости о стенки трубы [13];  $R$  – радиус отверстия трубы;  $g_{11}, g_{12}, g_{22}$  – элементы матрицы (6).

Вектор  $\{R_j^{(n)}\}$  определяет реакции в узле  $j$  от сил трения интенсивностью  $\tau_0$ :

$$R_j^{(n)} = \tau_0 l \{1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0\}^T.$$

В частном случае изотропного тела формулы (16) получают известный вид:

$$\varepsilon_\tau = \alpha \Delta T, \quad \varepsilon_p = (p_m + \rho_{жс} v_m^2) \times \frac{1-2\mu}{2E} \frac{R}{h}, \quad \varepsilon_{\tau_0} = \frac{\tau_0 l}{2EA}. \quad (17)$$

### 5. Анализ параметров напряжённо-деформированного состояния трубопровода с протекающей жидкостью.

С помощью программного комплекса ASCP [13] и стержневого конечного элемента выполним анализ параметров НДС трубопровода с протекающей жидкостью.

Расчётная схема трубопровода изображена на рис. 2 (размеры в мм). Имеем 5 узловых точек и 4 прямолинейных КЭ. Рассмотрим режим невозмущённого внутреннего течения. Параметры жидкости:  $\rho_{жс} = 1,02 \text{ г/см}^3$ ,  $v_m = 10 \text{ м/с}$ ,  $p_m = 0,898 \text{ МПа}$ ,  $\Delta T = 100 \text{ К}$ . Силами трения жидкости о стенки трубы пренебрегаем.

Сопоставим два варианта конструкций, различающихся устройством трубы.

## Результаты расчёта усилий и перемещений

Вариант конструкции	Перемещения т.з, мм		$N, кН$	$M_z^{max}, кНм$	Нагрузки на опоры 2 и 4	
	$u$	$v$			$R^{(2)}, кН$	$R^{(4)}, кН$
I	0,155	- 0,374	- 0,423	0,293	4,686	4,686
II	0,762	- 1.838	1,884	0,176	3,426	3,426

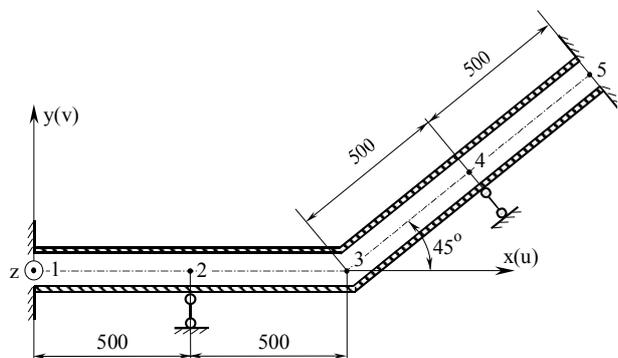


Рис. 2. Расчётная схема трубопровода

Вариант I – однослойная конструкция, выполненная из стали 36НХ (внутренний диаметр  $d = 96$  мм, толщина стенки  $h = 2$  мм). Вариант II – многослойная комбинированная конструкция, изготовленная путём перекрёстной спиральной намотки органопластика Kevlar49/PR-286 на оправку из стали 36НХ ( $d = 96$  мм, углы намотки  $\theta = \pm 60^\circ$ , толщина оправки  $h_1 = 0,3$  мм, толщина стенки  $H = 2$  мм).

В таблице для каждого варианта конструкций приведены расчётные перемещения  $u$  и  $v$ ; продольные усилия  $N$ ; максимальные значения изгибающих моментов  $M_z^{max}$ ; нагрузки на промежуточные опоры  $R^{(2)}$  и  $R^{(4)}$ . Отметим, однослойная металлическая труба (вариант I) работает на сжатие ( $N = - 0,423$  кН). Комбинированная труба из органопластика (вариант II) – на растяжение.

## Список литературы

1. Митрофанов, А.А. Лесосплав: новые технологии, научное и техническое обеспечение / А. А. Митрофанов. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2007. – 492 с.
2. Ялтанец, И.М. Справочник по гидромеханизации: Теория и практика открытых горных и строительных работ / И.М. Ялтанец. – М.: Изд-во МГТУ, 2011. – 737 с.

**Выводы.** Трубопроводный транспорт (гидромелиорации по улучшению водных путей, доставки измельчённой древесины и пр.) является важной составляющей развития лесопромышленного комплекса. Эффективное развитие энергосберегающих технологических процессов в лесной отрасли выдвигает необходимость разработки и применения научно обоснованных методов расчёта и оптимизации как при проектировании технологий и конструкций, так и при их эксплуатации. Выполненные в данной работе исследования решают эту задачу для трубопроводного транспорта путём построения новых методик и научно-технических решений.

В работе получены расчётные соотношения для коэффициентов матрицы жёсткости и вектора узловых сил КЭ тонкостенного трубопровода, изготовленного из волокнистого композита. Рассмотрено двухкомпонентное статическое нагружение, включающее действие температуры и внутреннего давления. Учитывается слоистая структура материала и анизотропия термоупругих свойств. Выполнен расчёт модельного трубопровода.

Получены достоверные результаты, имеющие важное научно-техническое значение для проектирования и расчёта трубопроводных напорных гидротранспортных систем при сложном нагружении.

## References

1. Mitrofanov A.A. Lesosplav: novye tekhnologii, nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie [Timber Floating: New Technologies, Scientific and Engineering Support]. Arkhangelsk: AGTU Publ., 2007. 492 p.
2. Yaltanets I.M. Spravochnik po gidromekhanizatsii: teoriya i praktika otkrytykh gornykh i stroitelnykh rabot [Guide on Hydromechanization: Theory and Practice of Open Mountainous and Construction Works]. Moscow: MGGU Publ., 2011. 737 p.

3. *Тарабан, М.В.* Возможности повышения эффективности технологического процесса трубопроводного гидротранспорта щепы / М.В. Тарабан // Лесозэксплуатация: Сб. науч. раб. – Красноярск: КГТА, 2005. – С. 14-18.
4. *Лоскутов, Ю.В.* Расчёт конструкций композитных трубопроводов для гидромеханизации дноуглубительных работ по улучшению лесосплавных путей / Ю.В. Лоскутов // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. –2012. – № 1. – С. 35-43.
5. *Васильев, В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов / В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 с.
6. *Кноэл, А.* Расчет ферм, балок, рам и тонкостенных элементов / А. Кноэл, Е. Робинсон // Композиционные материалы: В 8 томах. – Т. 7. Анализ и проектирование конструкций; под ред. К.Чамиса. – М.: Машиностроение, 1978. — 300 с.
7. *Попов, Б.Г.* Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами / Б.Г. Попов – М.: Изд-во МГТУ, 1993. – 294 с.
8. *Болотин, В.В.* Механика многослойных конструкций / В.В. Болотин, Ю.Н. Новичков. – М.: Машиностроение, 1980. – 376 с.
9. *Алфутов, Н.А.* Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984. – 263 с.
10. *Биргер, И.А.* Сопrotivление материалов / И.А. Биргер, Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1986. – 560 с.
11. *Куликов, Ю.А.* Размеростабильные конструкции цилиндрических сосудов давления и трубопроводов из многослойных композитов / Ю.А. Куликов, Ю.В. Лоскутов // Механика композиционных материалов и конструкций. ИПрИМ РАН. – 2000. –Т. 6, № 2. – С. 181-191.
12. *Лоскутов, Ю.В.* Прямолинейный стержневой конечный элемент для расчета композитных трубопроводов для
3. *Taraban M.V.* Vozmozhnosti povysheniya effektivnosti tekhnologicheskogo protsessa truboprovodnogo gidrotransporta shchepy [Possibilities for Efficiency Improvement of Technological Process of Pipe Hydrotransport of Wood Chips]. Sbornik nauchnykh rabot «Lesoekspluatatsiya [Collection of Scientific Papers «Forest Exploitation»]. Krasnoyarsk: KGTA, 2005. P. 14-18.
4. *Loskutov Yu.V.* Raschet konstruktsiy kompositnykh truboprovodov dlya gidromekhanizatsii dnouglubitelnykh rabot po uluchsheniю лесосплавных путей [Structural Analysis of Composite Pipelines for Hydromechanisation of Dredging Operations for Improvement of Floating Routes]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser.: Les. Ekologiya. Prirodopolzovanie. [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Forestry. Ecology. Nature Management]. 2012. No 1. P. 35-43.
5. *Vasilev V.V.* Mekhanika konstruktsiy iz kompozitnykh materialov [Mechanics of Constructions from Composite Materials]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1988. 272 p.
6. *Knoel A., Robinson E.* Raschet ferm, balok, ram i tonkostennykh elementov [Analysis of Trusses, Beams, Frames and Thin-Walled Elements]. Kompositnye materialy: v 8 tomakh. Tom 7. Analiz i proektirovanie konstruktsiy. Pod red. K. Chamis [Composite Materials: in 8 volumes. Analysis and Designing of Constructions. Under the editorship of K. Chamis]. Moscow: Mashinostroenie, 1978. Volume 7. 300 p.
7. *Popov B.G.* Raschet mnogoslonykh konstruktsiy variatsionno-matrichnymi metodami [Analysis of Sandwich Structures with the Help of Variational and Matrix Technique]. Moscow: MGTU Publ., 1993. 294 p.
8. *Bolotin V.V., Novichkov Yu.N.* Mekhanika mnogoslonykh konstruktsiy [Mechanics of Sandwich Structures]. Moscow: Mashinostroenie, 1980. 376 p.
9. *Alfutov N.A., Zinovev P.A., Popov B.G.* Raschet mnogoslonykh plastin i obolochek iz kompozitnykh materialov [Analysis of Composite Plates and Envelopes of Composite Materials]. Moscow: Mashinostroenie, 1984. 263 p.
10. *Birger I.A., Mavlutov R.R.* Soprotivlenie materialov [Structural Resistance]. Moscow: Nauka, 1986. 560 p.
11. *Kulikov Yu.A., Loskutov Yu.V.* Razmerostabilnye konstruktsii tsilindricheskikh sosudov davleniya i truboprovodov iz mnogoslonykh kompositov [Size-Stable Constructions of Cylindrical Vessels of Pressure and Pipelines from Layered Composites]. Mekhanika kompositnykh materialov i konstruktsiy [Mechanics of Composites and Constructions]. IPriM RAN. 2000. V. 6, No 2. P. 181-191.
12. *Loskutov Yu.V., Gizatullin R.G.* Pryamolineynyy stержevoy konechnyy element dlya rascheta kompozitnykh truboprovodov dlya

гидромеханизации работ по улучшению лесосплавных путей / Ю.В. Лоскутов, Р.Г. Гизатуллин // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 11 (ч.2). – С. 430-434.

13. Куликов, Ю.А. Жидкостные трубопроводы: Численное исследование напряженно-деформированного состояния, индуцированного стационарным внутренним потоком / Ю.А. Куликов // *Расчеты на прочность: Сборник научных статей*. – М.: Машиностроение, 1993. – Вып. 33. – С. 119-131.

gidromekhanizatsii rabot po uluchsheniyu lesosplavnykh putey [One-Linear Finite Element for the Analysis of Composite Pipelines for Hydromechanisation of Works Focused on Improvement of Floating Routes]. *Fundamentalnye issledovaniya* [Fundamental Researches]. 2012. No 11 (Part 2). P. 430-434.

13. Kulikov Yu.A. Zhidkostnyye truboprovody: Chislennoe issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya, indutsirovannogo stacionarnym vnutrennim potokom [Fluid Carrying Lines: Numerical Study of Strain-Stress State by the Induced Permanent Internal Flow.]. *Raschety na prochnost: Sbornik nauchnykh statey* [Strength Calculation: Collection of Scientific Articles.]. Moscow: Mashinostroyeniye, 1993. Issue 33. P. 119-131.

Статья поступила в редакцию 11.10.13.

*ЛОСКУТОВ Юрий Васильевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики, докторант, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – механика конструкций и материалов, механика сплошных сред, водный транспорт леса, методы математического моделирования, САПР. Автор 55 публикаций.

E-mail: loskutovyv@volgatech.net

*LOSKUTOV Yuriy Vasilievich* – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at the Chair of Resistance of Materials and Applied Mechanics, Candidate for a Doctor's Degree, Volga State University of Technology (Yoshkar-Ola, Russian Federation). Research interests – structural mechanics, continuum mechanics, water transport for forests, methods of mathematical simulation, CAD system. The author of 55 publications.

E-mail: loskutovyv@volgatech.net

*Yu. V. Loskutov*

#### COMPOSITE PIPELINES ANALYSIS: ONE-LINEAR FINITE ELEMENT

**Key words:** *composite mechanics; polymer composite materials; strength; stiffness; FEM; piping; floating route.*

*The paper covers the areas of engineering and mechanics of composites and deals with the problem of pipelines strength. The purpose of the article is to describe a technique of design calculation of composite pipelines of hydro-mechanization. The first task is to prepare a finite element model of straining under the loading of straight pipeline sections by the continuous winding patterns. The second task is to obtain the formulas to calculate elasticity relations, coefficients of stiffness matrix and the vector of nodal forces. A one-dimensional straight finite element to perform the strength-and-stiffness analysis of thin-walled pipes/ slurry pipelines was introduced. Some methods of structural mechanics and finite element method were applied to study the plane stress of composite pipes. As a result, the formulas for calculation of the coefficients of the stiffness matrix and the vector of nodal forces were obtained. The effect of temperature and internal pressure from the point of view of its static loading was considered. The distribution of thermal and hydrodynamic effects by an equivalent system of concentrated nodal forces was also outlined. The analysis of the parameters of stress-strain state of the pipeline with flowing liquid was introduced. A comparison between two differing embodiment pipelines was made: one pipe had a single-layer steel structure, the other one had a multi-layer structure made by cross-laminated helical winding of the organoplastic Kevlar 49/PR-286 on the steel plug. This paper may be used in the works on hydro-mechanization for improving of floating routes/ in oil and gas pipelines.*