

## ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ ЛЕСНОГО ДЕЛА

УДК 630.378, 539.3

*Ю. В. Лоскутов*

### РАСЧЁТ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ ДЛЯ ГИДРОМЕХАНИЗАЦИИ ДНОУГЛУБИТЕЛЬНЫХ РАБОТ ПО УЛУЧШЕНИЮ ЛЕСОСПЛАВНЫХ ПУТЕЙ

*Предложена методика расчёта трубопроводов из полимерных композитных материалов для гидромеханизации работ по улучшению лесосплавных путей. На основании линейной теории многослойных анизотропных оболочек и метода конечных элементов выполнено исследование упругого деформирования, напряжённого состояния и прочности тонкостенных криволинейных труб при чистом изгибе. Труба представлена в виде тонкостенной торообразной оболочки с переменными параметрами армирования и толщиной стенки. Результаты расчётов сопоставлены с данными известных решений и экспериментов. Исследована зависимость гибкости трубы от внутреннего давления, геометрических и структурных параметров. Проведён анализ прочности многослойного композитного образца. В зависимости от геометрии, структуры пакета слоёв и схемы армирования дан сопоставительный анализ результатов.*

**Ключевые слова:** *трубопроводы, полимерные композиционные материалы, лесосплавные пути, прочность, жёсткость, МКЭ.*

**Введение.** Для повышения лесопропускной способности на лесосплавных реках проводят мелиоративные работы (простые и сложные). Сложные мелиоративные работы, предусматривающие проведение русловыправительных и дноуглубительных работ и работ по спрямлению речного русла, существенно изменяют уровень и скоростной режим, а также плановую конфигурацию водотоков [1]. Для производства дноуглубительных работ на лесотранспортных водных путях используют землесосно-рефулёрные снаряды различных модификаций. Одним из способов отведения грунта с земснарядов землесосного типа является транспортировка обогащенной пульпы по специально смонтированным трубам – пульпопроводам (или грунтопроводам).

Пульпопровод – сооружение для размещения и поддержания на плаву трубопровода, по которому производится гидротранспорт пульпы от грунтового насоса на берег (рис. 1). При создании трубопроводов для земснарядов применяют различные материалы. Металлические трубопроводы (пульпопроводы) используются с начала становления гидромеханизации и по настоящее время [2]. Однако, в связи с большим весом, низкой износостойкостью и сложностью при монтаже, им на замену все чаще приходят современные пульпопроводы из полимерных композитных материалов (ПКМ).

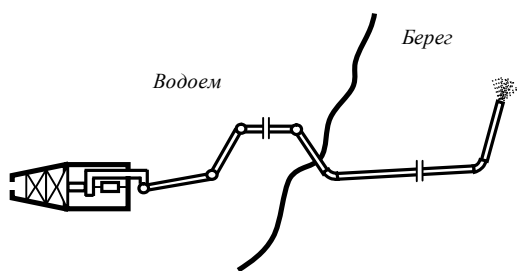


Рис. 1

Наиболее напряженными (в то же время и наиболее сложными в технологическом отношении) элементами трубопроводов являются криволинейные элементы (отводы или гибы). С одной стороны, они используются для обхода «препятствий», с другой – служат компенсаторами упругих деформаций. Упругие свойства гибов в решающей степени определяют поведение трубопровода под нагрузкой в целом.

Анализ литературы показывает [3], что существующие математические модели и методы относятся главным образом к конструкциям, изготовленным из традиционных (однородных и изотропных) материалов. Исследования с учетом особенностей слоисто-волоконистой структуры криволинейных трубопроводов из современных ПКМ практически отсутствуют.

Широкое применение композиционных материалов в современных конструкциях, стремление максимально использовать их достоинства определяет актуальность разработки методов исследования деформирования и напряженного состояния многослойных труб и трубопроводов, в том числе применяемых в гидромеханизации работ по улучшению лесосплавных путей, поэтому одной из актуальных задач является задача расчета криволинейных труб из многослойных композитов.

**Целью** работы является разработка методики расчета композитных трубопроводов для гидромеханизации работ по улучшению лесосплавных путей.

#### **Решаемые задачи:**

- 1) разработка конечно-элементной математической (МКЭ) модели деформирования под нагрузкой криволинейных и прямолинейных участков трубопроводов, изготовленных из ПКМ методом намотки;
- 2) обоснование достоверности предложенной математической модели;
- 3) проведение расчетно-аналитического эксперимента с целью изучения распределений полей напряжений и деформаций под различными видами нагружения;
- 4) анализ влияния на напряженное и деформированное состояние технологии и способа намотки, внутреннего давления. Выявление основных зависимостей.

**Математическое моделирование.** С целью анализа упругого деформирования, напряженного состояния и прочности при изгибе многослойных композитных труб разработана конечно-элементная модель [3]. Криволинейная труба рассматривается как торообразная тонкая оболочка, плавно сопряженная с цилиндрическими оболочками (рис. 2). Для дискретизации оболочки используется треугольный конечный элемент (КЭ). Это универсальный КЭ естественной кривизны, предназначенный для аппроксимации произвольных поверхностей [4]. Он имеет 6 узлов по 5 степеней свободы в каждом. Расчетные соотношения строятся на основе смешанной вариационной формулировки принципа Хеллингера-Рейсснера и теории анизотропных слоистых оболочек с использованием гипотез Тимошенко. На основе независимой интерполяции перемещений и деформаций строится матрица жёсткости КЭ.

Система разрешающих уравнений МКЭ имеет вид:

$$[C(p_m)]\{q\} = \{P\}, \quad (1)$$

где  $[C(p_m)]$  – матрица жёсткости конструкции,  $\{P\}$  – вектор нагрузки,  $p_m$  – интенсивность внутреннего давления. Оболочка считается как предварительно напряжённая конструкция: учитывается влияние мембранных усилий. Мембранные усилия определяются в зависимости от внутреннего давления по формулам безмоментной теории

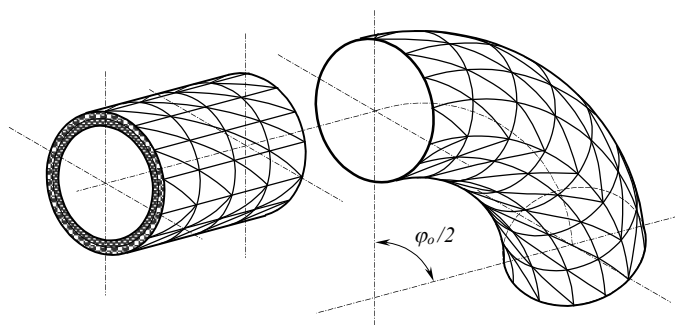


Рис. 2. Расчетная модель

Рассматривается статическое нагружение трубы изгибающим моментом. Момент действует в плоскости кривизны трубы. Задача рассматривается как физически и геометрически линейная. Перемещения и деформации считаются малыми, геометрические параметры: углы укладки волокон, толщины слоёв и пакета в целом в процессе нагружения не изменяются.

Коэффициенты матрицы жёсткости КЭ вычисляются численно посредством семиточечной схемы квадратур Гаусса на треугольной области. В каждой точке интегрирования рассчитываются параметры армирования, толщины стенки и эффективные упругие постоянные в зависимости от упругих свойств волокна и матрицы, а также объёмной доли волокон в композите [5]. Анализ распределений углов и коэффициентов армирования, а также эффективных упругих постоянных для многослойных криволинейных труб в зависимости от технологической схемы намотки представлен в [3, 5]. Для расчёта упругих постоянных пакета слоёв используется структурная модель [6].

С целью оценки эффективности и точности расчёта выполнено тестирование модели. В [3] показано применение разработанной модели МКЭ к расчету металлических труб из однородных и изотропных материалов. Дана оценка точности, на ряде примеров доказана сходимость приближенных решений МКЭ к точным аналитическим решениям и экспериментам.

Рассмотрим многослойные перекрестно-армированные трубы. На рис. 3 представлена тонкостенная цилиндрическая оболочка, нагруженная сосредоточенной силой  $P = 0,98$  кН. Геометрические характеристики оболочки:  $r = 0,112$  м;  $r/h = 29,1$ ;  $L = 2,37 r$ . Края оболочки шарнирно закреплены «по кольцу». Оболочка изготовлена из ортогонально армированного стеклопластика (стеклотекстолита): модули упругости стенки  $E_x = 19,6$  ГПа,  $E_y = 30,5$  ГПа; модули сдвига  $G_{xy} = 4,76$  ГПа,  $G_{xz} = G_{yz} = 2,06$  ГПа; коэффициенты Пуассона  $\nu_{xy} = 0,0915$ ,  $\nu_{yx} = 0,1425$ . Здесь  $r$  – средний радиус поперечного сечения;  $h$  – толщина стенки. Индексы  $x$ ,  $y$  и  $z$  определяют осевое, окружное и радиальное направления соответственно.

Результаты расчёта МКЭ сопоставлены с данными аналитического решения и эксперимента [7]. Анализ результатов (рис. 3) показывает, что расчёт МКЭ для прогиба  $w$  в радиальном направлении практически совпадает с известными данными.

Исследуем гибкость серии из четырех образцов с углами  $\varphi_0 = 180^\circ$ . Геометрические размеры образцов приведены в табл. 1. Здесь же указаны номинальные толщина стенки и углы укладки волокон на экваторе. Образцы изготовлены путём перекрестной спиральной намотки стеклоткани Т-10, предварительно пропитанной связующим УПЭ-22-27. Ширина ленты – 30 мм, номинальное число слоёв – шесть. Упругие характеристики стеклоткани:  $E_1 = 29,4$  ГПа,  $E_2 = 17,8$  ГПа,  $G_{12} = 3,01$  ГПа,  $\nu_{12} = 0,123$  получены экспериментально [8] путём испытаний трубчатых и плоских образцов на растяжение, сжатие и кручение (сдвиг). Индекс 1 обозначает направление основы ткани, индекс 2 – направление утка.

тонких торообразных оболочек. При этом интенсивность внутреннего давления считаем как  $p_m = p + \rho_{ж} v_m^2$ , где  $p$  и  $v_m$  – составляющие давления и скорости стационарного внутреннего потока,  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости. Предполагается, что жидкость (пульпа) идеальная, а поток – напорный.

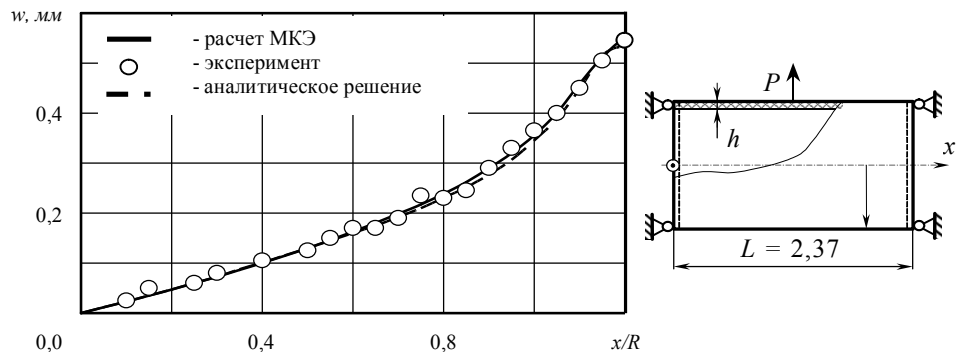


Рис. 3. Цилиндрическая оболочка

В табл.1 расчётные коэффициенты увеличения гибкости  $k$  сопоставлены с данными эксперимента [8]. Коэффициент  $k$  показывает, во сколько раз гибкость криволинейной трубы больше гибкости прямолинейной трубы-аналога. Он определяется как отношение приращений кривизн:  $k = \bar{K}_o / K_o$ , где  $\bar{K}_o = \Delta\varphi_o / (R\varphi_o)$ ,  $K_o = M_z / (E_x I_z)$ . Здесь  $\Delta\varphi_o$  – приращение центрального угла  $\varphi_o$  криволинейного участка при действии изгибающего момента  $M_z$ ,  $E_x I_z$  – жёсткость поперечного сечения трубы на изгиб. Константируем, результаты расчёта МКЭ удовлетворительно согласуются с результатами эксперимента [8]. Расхождение результатов объясняется некоторой неопределённостью граничных условий, связанных с передачей нагрузки (изгибающих моментов) на опытные образцы.

Таблица 1

Радиус кривизны оси трубы $R$ , см	Угол укладки волокон на экваторе $\theta_m$ , °	Средний радиус поперечного сечения $r$ , см	Номинальная толщина стенки трубы $h_m$ , см	$r/R$	$r/h_m$	Коэффициенты увеличения гибкости	
						Эксперимент [8]	Расчёт МКЭ
8,0	85,6	4,16	0,191	0,52	21,8	13,9	12,5
9,0	83,5	3,12	0,179	0,35	17,4	8,1	6,7
8,0	79,8	2,13	0,172	0,27	12,4	4,9	3,1
12,0	78,9	2,19	0,163	0,18	13,5	3,2	2,3

**Анализ жёсткости композитных образцов.** Рассмотрим образец криволинейной трубы с углом гиба  $\varphi_o=180^\circ$ . Геометрические размеры трубы приведены в табл. 2, где  $R$  – радиус кривизны оси,  $r$  – средний радиус поперечного сечения,  $h_m$  – толщина стенки на экваторе. Толщина стенки на экваторе тора равняется толщине стенки примыкающих цилиндрических оболочек.

Таблица 2

$R$ , мм	$r$ , мм	$h_m$ , мм	$r/R$	$r/h_m$
190,5	62,74	1,57	0,329	40,0

Труба изготовлена путём перекрестной спиральной намотки двух симметричных систем волокон на оправку. Волокна уложены по геодезическим траекториям. Материал трубы – органопластик Kevlar 49/PR-286 имеет следующие характеристики [9]:  $E_1=64,1$  ГПа,  $E_2 = 5,38$  ГПа,  $G_{12} = 2,07$  ГПа,  $\nu_{12}=0,35$ . Индексы 1 и 2 соответствуют направлениям вдоль и поперёк волокон. В результате намотки формируется симметричная относительно срединной поверхности структура пакета слоёв с переменными параметрами армирования. Распределения параметров армирования и толщины стенок показаны в [3, 5].

На рис.2 представлена расчётная модель композитного образца. С учётом симметрии изображена лишь его половина. Использована регулярная конечно-элементная сетка  $M \times N$ , где  $M = 36$  и  $N = 15$  – количество делений в окружном и осевом направлениях соответственно. Расчётная модель образца включает 1080 КЭ с 11315 степенями свободы.

На рис. 4 представлены графики коэффициентов увеличения гибкости  $k$  в зависимости от угла укладки волокон на экваторе  $\theta_m$  и параметра тонкостенности  $r/h_m=22,5$ ; 40; 50 и 69. Констатируем, что при увеличении угла  $\theta_m$  и толщины стенки  $h_m$  гибкость криволинейной трубы уменьшается. Труба при изгибе становится более жёсткой.

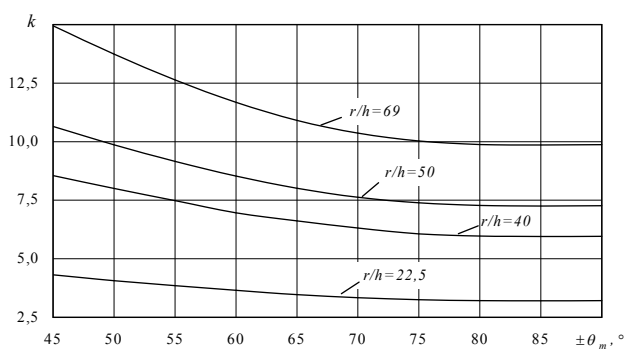


Рис. 4. Зависимость коэффициента  $k$  от угла укладки  $\theta_m$  и параметра тонкостенности  $r/h_m$

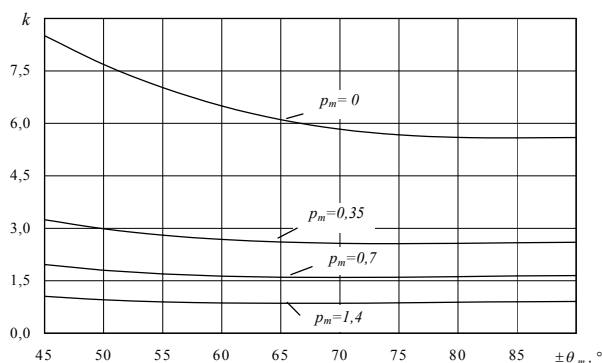


Рис. 5. Зависимость коэффициента  $k$  от угла укладки волокон  $\theta_m$  и внутреннего давления  $p_m$ .

На рис. 5 представлены графики зависимостей коэффициентов увеличения гибкости  $k$  от угла  $\theta_m$  и интенсивности внутреннего давления  $p_m = 0$ ; 0,35; 0,7 и 1,4 МПа. Из графиков видно, что с увеличением внутреннего давления  $p_m$  и угла  $\theta_m$  гибкость криволинейной трубы уменьшается. При давлении  $p_m = 1,4$  МПа расчётные значения коэффициентов  $k$  приближаются к единице. При повышенном давлении эффект Кармана (сплющивание поперечного сечения при изгибе) заметно ослабляется.

**Оценка прочности композитных образцов.** Расчётная оценка прочности композитного образца включает несколько стадий, соответствующих естественным структурным уровням материала. На каждой стадии определяются осреднённые физико-механические характеристики. Упругие свойства композита описываются при помощи модели ортотропного тела. Применяется схема послойного анализа [6, 10], которая включает:

- расчёт приведённых упругих характеристик пакета с учётом свойств однонаправленного слоя и структуры материала;
- формирование и решение системы разрешающих уравнений (1), расчёт узловых перемещений и внутренних усилий в стенке;
- определение приведённых напряжений и деформаций однонаправленного слоя в зависимости от внутренних усилий в стенке (обратный переход).

Отметим, что при нагружении однонаправленного слоя реализуются различные формы разрушения: разрыв волокон, разрыв связующего, расслоение материала, разрыв адгезионных связей волокон и связующего, потеря устойчивости волокон при сжатии и т.д. Эти формы считаются взаимно независимыми. Критерии прочности имеют следующий вид [11, 12]:

$$F_{-1} \leq \sigma_{11} \leq F_{+1}; \quad F_{-2} \leq \sigma_{22} \leq F_{+2}; \quad |\sigma_{12}| \leq F_{12}, \quad (2)$$

где  $F_{+1}$  и  $F_{+2}$  – предельные растягивающие напряжения вдоль и поперёк волокон,  $F_{-1}$  и  $F_{-2}$  – соответственно предельные сжимающие напряжения,  $F_{12}$  – предельное касательное напряжение чистого сдвига;  $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ,  $\sigma_{12}$  – расчётные напряжения, записанные в главных осях анизотропии материала. Прочность однонаправленного слоя при плоском напряжённом состоянии характеризуется пятью независимыми пределами прочности, каждый из которых определяется на основе отдельного эксперимента.

Следует иметь в виду, что прочность органических волокон, волокон стекла, бора, углерода на разрыв на один – два порядка выше прочности матрицы, поэтому, при прочих равных условиях, характеристики прочности однонаправленного слоя пропорциональны содержанию волокон. Считаем, что с увеличением коэффициента армирования  $\psi$  предел прочности вдоль волокон линейно возрастает, то есть:

$$F_{+1} = \psi \sigma' + (1 - \psi) \sigma'' \quad (3)$$

Здесь  $\sigma'$  и  $\sigma''$  – пределы прочности волокна и матрицы соответственно. Соотношение (3) отражает так называемое «правило смесей» – вклад каждого компонента пропорционален его объёмной доле в композите.

При анализе прочности однонаправленного слоя определяются напряжения вдоль и поперёк волокон ( $\bar{\sigma}_{11}$  и  $\bar{\sigma}_{22}$ ), а также касательные напряжения  $\bar{\sigma}_{12}$  в точках наружной и внутренней поверхностей стенки центрального сечения (рис. 6,7). Напряжения представляются в безразмерном виде:  $\bar{\sigma} = \sigma / \sigma_0$ , где  $\sigma_0 = M_z r / I_z$ ,  $I_z$  – осевой момент инерции поперечного сечения относительно нейтральной оси,  $M_z = 0,1$  Нм – изгибающий момент.

На рис. 6 показано распределение нормальных напряжений  $\bar{\sigma}_{11}$  и  $\bar{\sigma}_{22}$  соответственно вдоль (рис. 6, а, б) и поперёк волокон (рис. 6, в, г); на рис. 7 – распределение касательных напряжений  $\bar{\sigma}_{12}$ . В распределении напряжений наблюдается определённая симметрия: напряжения на наружной поверхности (рис. 6, а, в) с точностью до 7–8 % равны напряжениям на внутренней поверхности (рис. 6, б, г) трубы.

**Интерпретация результатов вычислительного эксперимента.** Сравнительный анализ кривых на рис. 6,7 показывает, что при увеличении угла укладки волокон на экваторе тора:  $\theta_m = \pm 50^\circ, \pm 60^\circ, \pm 70^\circ$  и  $90^\circ$  максимальные значения нормальных напряжений  $\bar{\sigma}_{11}$  увеличиваются, а  $\bar{\sigma}_{22}$  – наоборот, уменьшаются. Максимальные значения касательных напряжений  $\bar{\sigma}_{12}$  при увеличении угла  $\theta_m$  сначала увеличиваются, затем – уменьшаются. Наименьшие значения напряжений  $\bar{\sigma}_{12}$  получаются при  $\theta_m = 90^\circ$ .

Наиболее напряжённой областью при изгибе оказывается область наружной поверхности трубы с координатой  $\alpha \approx 90^\circ$  (на экваторе тора). Эта область работает в условиях двухосного растяжения (причём как вдоль, так и поперёк волокон) и сдвига. Здесь нормальные напряжения  $\bar{\sigma}_{22}$  и касательные напряжения  $\bar{\sigma}_{12}$  получаются одного порядка с нормальными напряжениями  $\bar{\sigma}_{11}$ , действующими вдоль волокон.

Армированный пластик – материал с ярко выраженной анизотропией прочности. Для однонаправленного органопластика пределы прочности при растяжении вдоль и поперёк волокон, а также при чистом сдвиге относятся как [13]

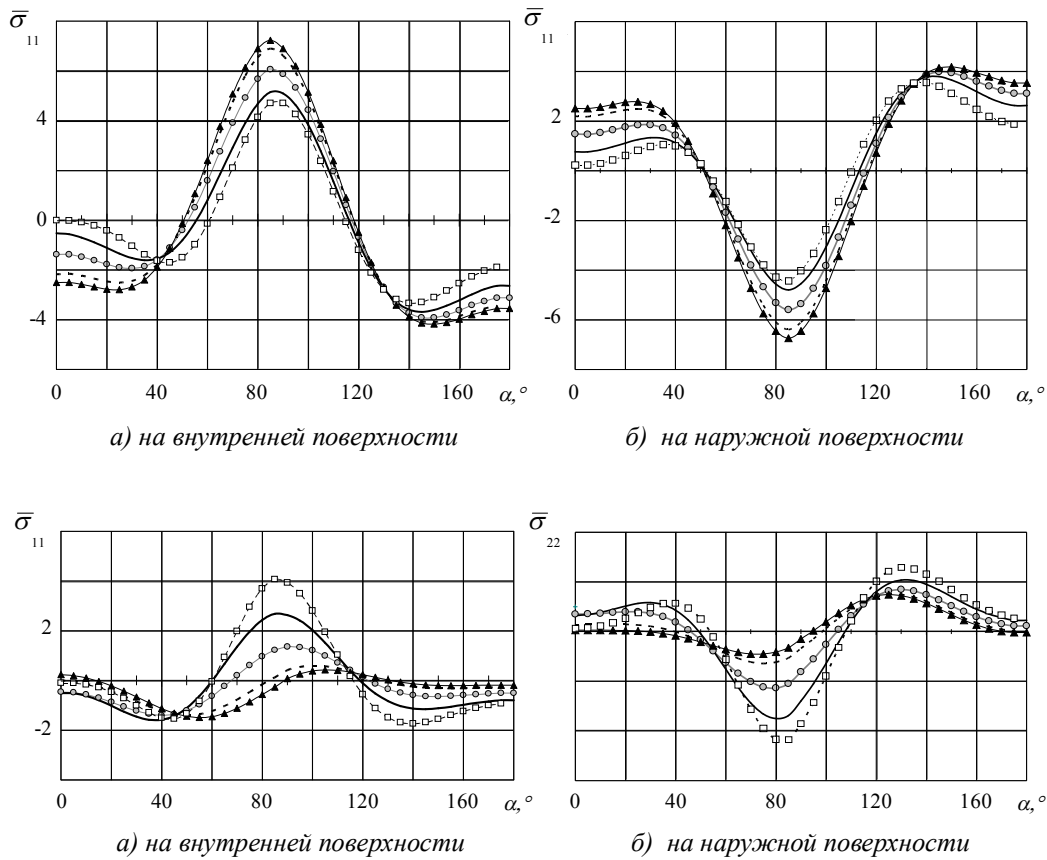


Рис. 6. Нормальные напряжения вдоль  $\bar{\sigma}_{11}$  и поперек волокон  $\bar{\sigma}_{22}$

$\blacktriangle$  —  $\theta_m = 90^\circ$ ;     $-\square-$  —  $\theta_m = \pm 80^\circ$ ;     $\bigcirc$  —  $\theta_m = \pm 70^\circ$ ;  
 $\text{—}$  —  $\theta_m = \pm 60^\circ$ ;     $-\square-$  —  $\theta_m = \pm 50^\circ$ .

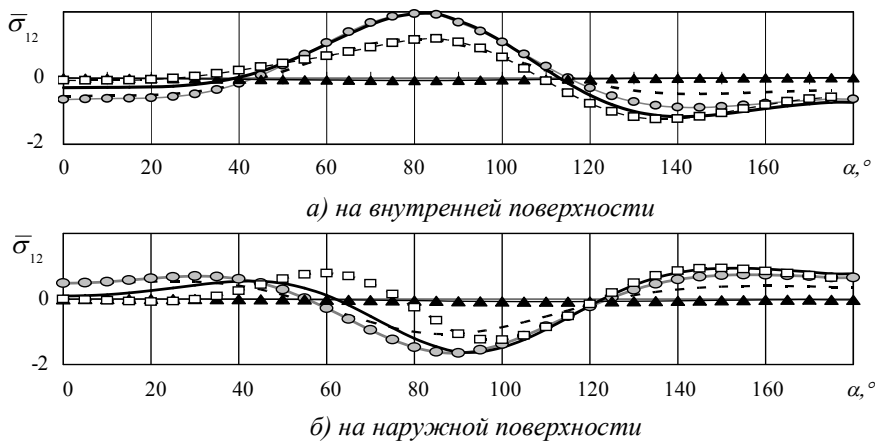


Рис. 7. Касательные напряжения  $\bar{\sigma}_{12}$

$\blacktriangle$  —  $\theta_m = 90^\circ$ ;     $-\square-$  —  $\theta_m = \pm 80^\circ$ ;     $\bigcirc$  —  $\theta_m = \pm 70^\circ$ ;  
 $\text{—}$  —  $\theta_m = \pm 60^\circ$ ;     $-\square-$  —  $\theta_m = \pm 50^\circ$ .

$$\frac{F_{+1}}{F_{+2}} \approx 80 \div 110 \quad \text{и} \quad \frac{F_{+1}}{F_{12}} \approx 50 \div 70. \quad (4)$$

В табл. 3 дано сопоставление относительных значений максимальных расчётных напряжений  $\bar{\sigma}_{11}/\bar{\sigma}_{22}$  и  $\bar{\sigma}_{11}/\bar{\sigma}_{12}$  в зависимости от угла  $\theta_m$ .

Таблица 3

Угол $\theta_m, ^\circ$	Отношение максимальных напряжений	
	$\frac{\bar{\sigma}_{11}}{\bar{\sigma}_{22}}$	$\frac{\bar{\sigma}_{11}}{\bar{\sigma}_{12}}$
90	17	97
80	11,5	14,5
70	4,5	3,1
60	1,9	2,6
50	1,2	3,8

Очевидно, форма разрушения зависит от соотношений напряжений. Сопоставляя отношения (4) с данными табл.3, заключаем, что при чистом изгибе многослойного образца форма разрушения однонаправленного слоя не зависит от угла укладки волокон на экваторе. При любом угле  $\theta_m$  вначале будет иметь место разрыв связующего или адгезионных связей волокон и связующего. Это приводит к образованию трещин, направленных вдоль волокон.

При работе однонаправленного композита в составе пакета многослойной трубы, содержащего разноориентированные слои, после разрушения отдельного слоя этот слой будет продолжать работать и вносить вклад в общую несущую способность конструкции. В то же время разрушение отдельного слоя приводит к зарождению трещины. В свою очередь, трещины в стенках труб и трубопроводов приводят к разгерметизации системы в целом, к нарушению её функциональных свойств.

#### Выводы

1. Предложена методика расчёта композитных трубопроводов для гидромеханизации работ по улучшению лесосплавных путей. В рамках методики представлена расчётная модель многослойной криволинейной трубы, изготовленной намоткой волокнистого композита. Труба рассматривается как тонкостенная торообразная оболочка с переменными параметрами армирования и толщиной стенки. Для вывода расчётных зависимостей используются теория анизотропных слоистых оболочек и метод конечных элементов.

2. Выполнен расчёт тонкостенной цилиндрической оболочки из ортогонально армированного стеклопластика. Показано, что результаты расчёта МКЭ хорошо согласуются с данными известных аналитического решения и эксперимента.

3. Проведён анализ жёсткости при чистом изгибе серии образцов многослойных криволинейных труб из перекрёстно армированного стеклопластика. Расчётные коэффициенты увеличения гибкости сопоставлены с данными известного эксперимента. Получено удовлетворительное их соответствие друг другу.

4. Рассмотрена зависимость гибкости многослойной криволинейной трубы от внутреннего давления, геометрических и структурных параметров. Показано, что с увеличением внутреннего давления, толщины стенки и угла укладки волокон на экваторе тора гибкость трубы, связанная со сплющиванием поперечного сечения (эффектом Кармана), уменьшается.

5. Выполнен анализ прочности многослойного композитного образца. В зависимости от геометрии, структуры пакета слоёв и схемы армирования дан сопоставительный анализ результатов.

#### Список литературы

1. Митрофанов, А. А. Лесосплав: новые технологии, научное и техническое обеспечение / А.А. Митрофанов; АГТУ. – 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.



3. Куликов, Ю. А. Механика трубопроводов из армированных пластиков / Ю.А. Куликов, Ю.В. Лоскутов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – 156 с.
4. Попов, Б. Г. Расчет многослойных конструкций вариационно-матричными методами / Б.Г. Попов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 1993.–294 с.
5. Лоскутов, Ю. В. Упругие характеристики многослойных криволинейных труб из армированного пластика / Ю.А. Куликов, С.В. Шлычков, Е.Б. Темнова // Механика композиционных материалов и конструкций (ИПриМ РАН) – 2006. – Т.12. – № 2. – С. 219-233.
6. Алфутов, Н. А. Расчет многослойных пластин и оболочек из композиционных материалов / Н.А. Алфутов, П.А. Зиновьев, Б.Г. Попов. – М.: Машиностроение, 1984. – 264 с.
7. Елпатьевский, А. Н. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов / А.Н. Елпатьевский, В.В. Васильев. – М.: Машиностроение, 1972. – 168 с.
8. Тышкевич, В. Н. Экспериментальное исследование прочности и жесткости стеклопластиковых криволинейных труб при чистом изгибе / В.Н. Тышкевич, В.Н. Харитонов // Волгогр. гос. техн. ун-т.-Волгоград, 1998. – 11 с. (Деп. рук. ВИНТИ; № 390-В98).
9. Зиновьев, П. А. Термостабильные структуры многослойных композитов / П.А. Зиновьев // Механика конструкций из композиционных материалов / Под ред. В.В. Васильева и В.Д. Протасова. – М.: Машиностроение, 1992. – С.193-207.
10. Лоскутов, Ю. В. Прочность и жёсткость криволинейных многослойных композитных труб при чистом изгибе / Ю.В. Лоскутов, Ю.А. Куликов // Механика композиционных материалов и конструкций (ИПриМ РАН) – 2008. – Т.14. – № 2. – С. 157-166.
11. Zinoviev, P. A. Strength of multilayered composites under a plane-stress state / P.A. Zinoviev, S.V. Grigoriev, O.V. Lebedeva, L.P. Tairova // Composite Science and Tachnology. – 1998. – Vol.58. – P.1209-1223.
12. Зиновьев, П. А. Предельные возможности многослойных композитных структур/ П.А. Зиновьев, А.А. Смердов// Известия РАН. Механика твёрдого тела. – 1994. – Т.1. – С.7-17.
13. Композиционные материалы: Справочник/ Под ред. В.В.Васильева, Ю.М.Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512 с.

Статья поступила в редакцию 10.12.11.

Результаты получены при выполнении поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы, а также гранта РФФИ № 10-08-97017-р\_поволжье\_а.

*Ju. V. Loskutov*

#### COMPOSITE PIPINGS STRUCTURES CALCULATION FOR HYDROMECHANIZATION OF DREDGING WORKS IN FLOATING ROUTES IMPROVEMENT

*A methods of calculating of pipings made of polymer composites for hydromechanization of dredging works in floating routes improvement is offered. On the basis of the linear theory of multilayered anisotropic shells and the finite element method, the research of elastic deformation, stress state and strength of thin-walled curvilinear tubes under pure bending is carried out. The pipe is presented in the form of a thin-walled toroidal shell with variable parameters of reinforcement and wall thickness. The results of calculations are compared with known data and results of experiments. Pipes flexibility dependence on internal pressure, geometrical and structural parameters is investigated. The analysis of strength of laminated composite sample is carried out. A comparative analysis of the results depending on the schemes of reinforcement, the geometry and the structure of sandwich of layers is given.*

**Keywords:** *pipings, polymer composites, floating route, strength, stiffness, FEM.*

---

ЛОСКУТОВ Юрий Васильевич – кандидат технических наук, доцент кафедры сопротивления материалов и прикладной механики МарГТУ, докторант. Область научных интересов – механика конструкций и материалов, механика сплошных сред, водный транспорт леса, методы матмоделирования, САПР. Автор 55 публикаций.

E-mail: loskutovyv@marstu.net