

**В. В. Можаровский, Д. С. Кузьменков**  
г. Гомель, ГГУ им. Ф. Скорины

**РЕАЛИЗАЦИЯ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО  
СОСТОЯНИЯ СЛОИСТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ  
ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Рассмотрим многослойную трубу из композитных материалов (рисунок 1). На трубу действует внутреннее давление  $p_0$ . Необходимо определить напряжения и перемещения, возникающие в многослойной трубе. При расчете напряженно-деформированного состояния трубопроводов и систем трубопроводов из-за сложной геометрии и особенностей конструкционного строения стенок труб, а также в связи с необходимостью моделирования различных слоистых тел, наряду с аналитическими расчетами эффективно применяется и метод конечных элементов.

Напряжения и перемещения определяются аналогично [1] при условии, что  $E_y = E_z$ ,  $G_{yy} = G_{zz}$ ,  $\nu_{zx} = \nu_{yx}$ . Был разработан алгоритм и создана программа, реализующая расчет напряжений и перемещений многослойных труб из композиционных материалов. Программа реализована в среде Delphi в виде многооконного приложения, обработаны все возможные случаи ввода некорректных данных. Реализована возможность записи и чтения из файла всех вводимых характеристик. Предусмотрена возможность выбора интервала по  $r$  и количества разбиений по  $r$ . Было просчитано множество различных примеров (различные материалы, давление и т. д.). Рассмотрим один из них.  $r_0 = 0.05\text{мм}$ ,  $r_1 = 0.052\text{мм}$ ,  $r_2 = 0.072\text{мм}$ ,  $r_a = 0.074\text{мм}$ ,  $\Delta T = 100\text{К}$ ,  $p_0 = 0.1\text{ГПа}$ . Названия и характеристики материалов труб приведены в таблице 1.

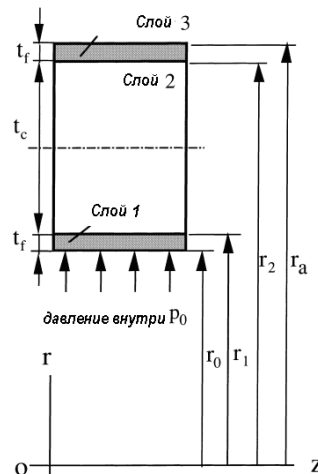


Рисунок 1 – Схема расчета многослойной трубы, где  $t$  – толщина слоя

Таблица 1 – Характеристики материалов для примера [1]

Свойства	T 300/934	Резина	Е-стекло/эпокс.
$E_x$ (GPa)	141,6	1,2	43,4
$E_y$ (GPa)	10,7	1,2	15,2
$G_{zz}$ (GPa)	3,88	0,46	6,14
$\nu_{yx}$	0,268	0,30	0,29
$\nu_{zy}$	0,495	0,30	0,38
$\alpha_x$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )	0,006	110	2,32
$\alpha_y$ ( $10^{-6} K^{-1}$ )	30,04	110	35,19
$\phi$	60	0	60

Ниже на рисунках 2 и 3 приведены полученные результаты для рассматриваемого примера (радиус  $r$  приведен в мм., а  $\sigma_r^{(k)}$ ,  $\sigma_\theta^{(k)}$  в МПа, аналогичные графики были построены и для  $\sigma_z^{(k)}$ ). На основании полученных результатов можно сделать вывод, что увеличение давления пропорционально ведет к увеличению  $\sigma_r^{(k)}$ ,  $\sigma_\theta^{(k)}$ ,  $\sigma_z^{(k)}$ .

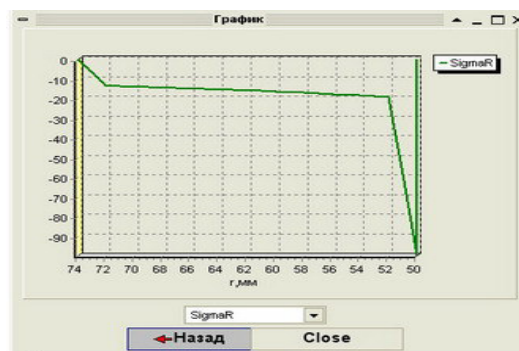


Рисунок 2 – График зависимости  $\sigma_r^{(k)}$  от  $r$

Разбиение расчетной области, производится нерегулярной сеткой, треугольными конечными элементами. Увеличение количества конечных элементов (процедура дробления) в местах концентрации напряжений позволяет достичь наибольшей точности при расчетах.

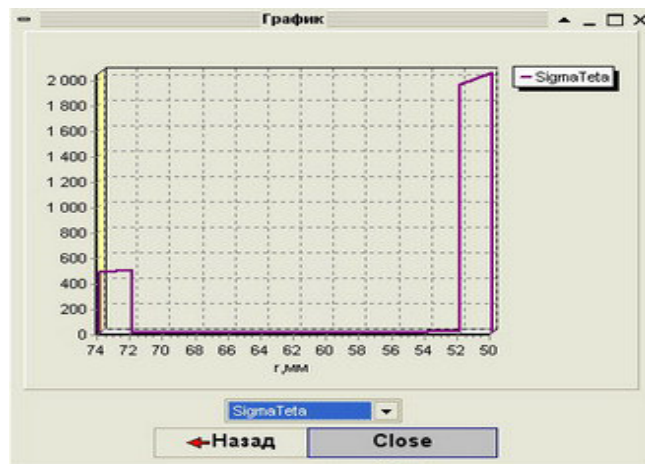


Рисунок 3 – График зависимости  $\sigma_{\theta}^{(k)}$  от  $r$

Разработанный программный комплекс позволяет свободно варьировать материалами покрытия труб и их характеристиками и показывает правдоподобные результаты. Программа не только определяет напряжения и перемещения слоистых труб, но и проверяет использованные в трубах материалы слоев ( $E_x, E_y, G_{zz}, \nu_{yx}, \nu_{yz}, \alpha_x, \alpha_y$ ) на допустимость (см. формулы (1)–(2)).

$$\sigma_{np} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2} \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2} \quad (1)$$

$$\sigma_{np} \leq \sigma_{доп}, \quad (2)$$

где  $\sigma_{доп}$  – допустимое напряжение.

После расчета всех напряжений и перемещений перед выводом результатов в табличном виде выводится текстовое сообщение с информацией о том, подходит ли данный материал, исходя из допускаемого напряжения.

Разработанная программа была включена в состав разработанного ранее программного комплекса выбора труб с покрытиями для их испытания и расчета [2]. Главное окно программного комплекса приведено на рисунке 4. Данная программа позволяет производить расчет и хранение различных характеристик стальных труб ППУ (наружный диаметр изолированной трубы, отклонение осевой линии от оси оболочки, водопоглощение, прочность на сдвиг в осевом и тангенциальном направлении и т. д.) и ПИ-труб (плотность, показатель текучести расплава, термоусадка и т. д.).

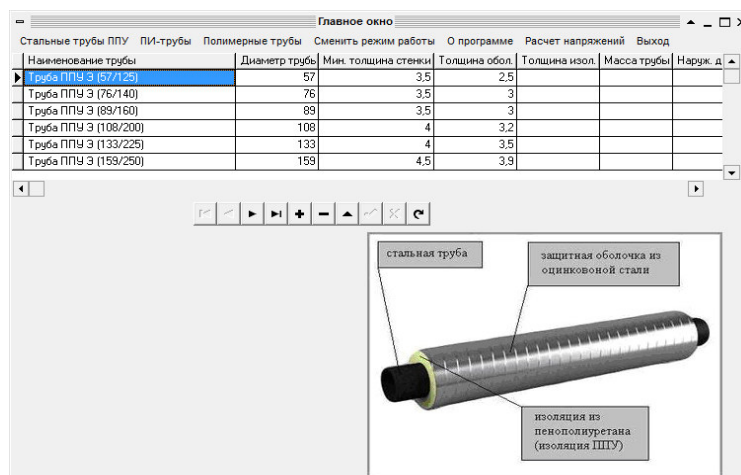


Рисунок 4 – Главное окно программного комплекса

На рисунке 5 приведена схема экспериментального исследования и результаты вычисления прочности на сдвиг для выбранной стальной трубы ППУ.

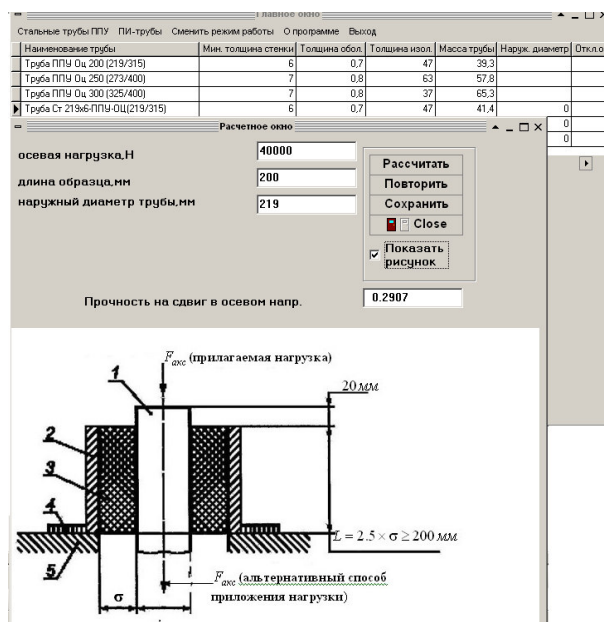


Рисунок 5 – Схема экспериментального исследования прочности на сдвиг

В программе предусмотрена возможность построения отчетов по рассчитанным характеристикам. База данных построена по технологии ADO. Приложение запускается из любого места (флешка, дискета, жесткий диск) без предварительной настройки и не требует наличие на компьютере специальных программ (Borland Delphi7, BDE Administrotor и т. д.). Также программа имеет возможность сравнения рассчитанных характеристик с ГОСТ и сделать вывод о соответствии или несоответствии трубы ГОСТ (рисунок 6).

Сравнение характеристик с ГОСТом			
Показатель	Требования	Расчет. значения	Результат
Плотность тепловой изоляции, кг/куб.м	не менее 60	61.0000	Соответствует
Прочность ППУ при сжатии, МПа	не менее 0.15	0.1600	Соответствует
Водопоглощение ППУ, %	не более 10	10.0000	Соответствует
Объемная доля закрытых пор ППУ, %	не менее 88	90.0000	Соответствует
Прочность на сдвиг в оевом напр., МПа	не менее 0.12	0.1400	Соответствует

**Вывод: Соответствует ГОСТу!**

Рисунок 6 – Сравнение с ГОСТ

Описанную методику и разработанный программный комплекс можно легко применить на другие трубопроводные системы, использующие новые материалы (в том числе и композиционные).

#### Список использованных источников

- Xia, M. Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading / M. Xia, K. Kemmochi, H. Takayanagi // Comp. Structures. – 2001. – № 51. – P. 273–283.
- Можаровский, В. В. Автоматизированная методика определения характеристик материалов для труб с ППУ-ОЦМ изоляцией / В. В. Можаровский, Д. С. Кузьменков, С. В. Шилько // Вестник Черниговского государственного технологического университета. Серия технических наук. – 2012. – № 3. – С. 42–47.