

**Выводы**

1. Получены аналитические выражения для описания радиационного баланса слоистой дисперсной среды с отражающей поверхностью: коэффициента пропускания, отражательной и поглощательной способности.
2. Показано, что приземный слой атмосферы даже при малой величине оптической плотности и/или ее малом изменении оказывает существенное влияние на отражательную способность системы «двухслойная дисперсная сре-

да – отражающая поверхность» независимо от коэффициента отражения подстилающей поверхности.

3. Изменение оптической плотности приземного слоя в большей степени влияет на отражательную способность системы, чем такое же изменение оптической плотности верхнего слоя при всех значениях коэффициента отражения подстилающей поверхности, а при оптической плотности свыше 5 практически не оказывает влияния.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Ленобль Ж. Перенос радиации в рассеивающих и поглощающих атмосферах. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 264 с.
2. Зуев В.Е., Титов Г.А. Оптика атмосферы и климат. – Л.: Гидрометеоздат, 1996. – 256 с.
3. Jin Z., Charlock T.P., Rutledge K., Stamnes K., Wang Y. Analytical solution of radiative transfer in the coupled atmosphere ocean system with a rough surface // Appl. Opt. – 2006. – V. 45 (28). – P. 7443–7455.
4. Kokhanovsky A.A., Budak V.P., Cornet C., et al. Benchmark results in vector atmospheric radiative transfer // J. Quant. Spectr. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – P. 1931–1946.
5. Zhai P.W., Hu Y., Chowdhary J., Trepte C.R., Lucker P.L., Josset D.B. A vector radiative transfer model for coupled atmosphere and ocean systems with a rough interface // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2010. – V. 111. – P. 1025–1040.
6. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Некоторые особенности переноса излучения в пространственно ограниченных дисперсных средах // Известия Томского политехнического университета. – 2000. – Т. 303. – № 3. – С. 91–104.
7. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Исследование влияния размеров и формы рассеивающего объема на радиационные характеристики переноса излучения // Известия Томского политехнического университета. – 2003. – Т. 306. – № 5. – С. 12–15.
8. Горячев Б.В., Могильницкий С.Б. Влияние отражающей поверхности на радиационный баланс дисперсной среды // Известия Томского политехнического университета. – 2012. – Т. 321. – № 2. – С. 39–42.
9. Дейрменджан Д. Рассеяние электромагнитного излучения сферическими полидисперсными частицами. – М.: Мир, 1971. – 168 с.

Поступила 21.09.2012 г.

УДК 539.3

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОЛИМЕРНЫХ ТРУБ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

С.А. Бочкарева\*, Ю.А. Реутов

Томский политехнический университет

\*Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск

E-mail: reutov@tpu.ru

*Обозначена актуальность задачи оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов из полимерных материалов численными методами. С использованием деформационно-прочностных свойств слоев произведен расчет трехслойной армированной полимерной трубы методом конечных элементов (МКЭ), получены графики распределения эквивалентных напряжений и перемещений. Приведено описание разработанного алгоритма численной реализации задачи и сравнение результатов работы программы с имеющимися аналитическими решениями. В качестве проверки достоверности результатов расчет повторен в программном комплексе ANSYS. Сделаны выводы о перспективности применения метода.*

**Ключевые слова:**

*Полимерные материалы, многослойные трубы, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, ANSYS.*

**Key words:**

*Polymer materials, multilayer pipes, stress-strain state, finite element method, ANSYS.*

Основным средством транспорта углеводородов в наши дни являются трубопроводы, на долю которых приходится более 90 % перекачиваемых нефти и газа. Проверенным и общепризнанным материалом для изготовления трубопроводов служит сталь. Это обусловлено рядом важных качеств

материала: прочность, устойчивость к разрывному давлению, низкий коэффициент теплового расширения, практически абсолютная герметичность. Однако использование стальных труб сопровождается существенными недостатками, основными из которых являются: подверженность коррозии,

большой вес, высокая теплопроводность. Они снижают срок службы, ухудшают гидравлические характеристики трубопровода, затрудняют процесс строительства. Производители и эксплуатирующие организации постоянно разрабатывают и совершенствуют методы борьбы с этими отрицательными факторами, но полностью избежать их невозможно. Поэтому параллельным направлением является создание труб из альтернативных материалов, самые перспективные из которых – полимерные материалы. Основными преимуществами труб из полимерных материалов являются: устойчивость к коррозии, легкость, гибкость и прочность, разнообразие методов соединения, превосходная гидравлика (расход на 50 % превышает расход в металлических трубопроводах того же диаметра), долговечность (срок службы составляет 20 лет при наземной прокладке и 50 лет при подземной прокладке) [1].

С целью улучшения прочностных характеристик труб в их конструкции применяют несколько слоев из разных материалов, в совокупности обеспечивающих высокую герметичность и прочностные свойства. Многослойные трубы имеют два или три слоя: бипластмассовые (полиэтиленовые трубы, упрочненные наружной стеклопластиковой оболочкой), трехслойные трубы (полиэтиленовые трубы, со средним армирующим слоем, представленным синтетической лентой или металлическими нитями) и т. д.

Одной из самых современных разработок среди многослойных полимерных труб является труба Soluforce RTP (от англ. reinforced thermoplastic pipe – усиленная термопластиковая труба). Труба Soluforce имеет три слоя. Внутренний сделан из полиэтилена (ПЭ 100), средним слоем является армирующая лента, а в качестве внешнего покрытия служит белый полиэтилен (ПЭ 100), стойкий к ультрафиолетовому излучению (рис. 1).



Рис. 1. Строение трубы Soluforce RTP

Применение труб Soluforce возможно при строительстве выкидных линий, систем нагнетания воды в пласт и в транспорте газа. Данные трубы могут применяться и в других областях, например в канализационных сетях и системах орошения. По прочностным характеристикам трубы Soluforce де-

лятся на три типа: легкий (Light), классический (Classic) с армирующим слоем из арамидной ленты и тяжелый (Heavy), вместо арамидной ленты упрочненный сеткой из стальных волокон. Каждый тип производится с внутренним диаметром 100 или 150 мм [2].

Однако существует ряд причин, по которым полимерные трубы не получают широкого распространения. Во-первых, отсутствуют научно обоснованные подходы к выбору критериев оценки работоспособности труб, недостаточен опыт их применения в различных условиях; во-вторых, исследование состояния трубопровода невозможно существующим оборудованием диагностики, применяемого для стальных трубопроводов. Для разработки обоснованных критериев работоспособности необходим анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) трубопроводов из полимерных материалов, поэтому выбор методов получения параметров НДС является актуальной проблемой.

Известным аналитическим методом определения параметров НДС трубы, находящейся под действием внутреннего давления, является решение задачи Ламе. Однако он не может применяться при расчете многослойной трубы. В этом случае используются численные методы, одним из которых является метод конечных элементов.

Задача определения деформационно-прочностных свойств полимерной многослойной трубы сводится к вычислению параметров напряженно-деформированного состояния, которое определяется уравнениями механики деформируемого твердого тела [3]. Численная реализация задачи определения параметров НДС конструкции проводилась методом конечных элементов [4] с использованием разбиения расчетной области на конечные элементы треугольной формы. Метод основан на принципе минимизации потенциальной энергии. Алгоритм расчета был реализован на языке программирования Fortran.

В силу осевой симметрии задачи рассматривается расчетная область, представляющая собой часть осевого сечения трубы, и решается осесимметричная задача теории упругости (рис. 2).

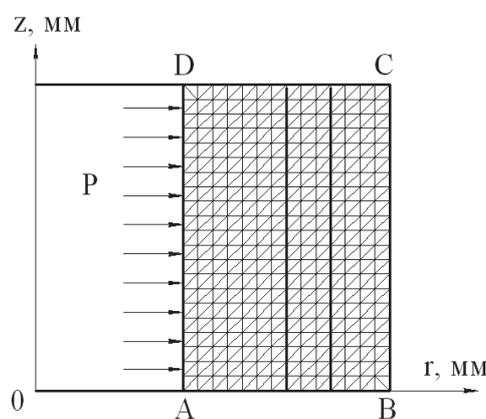


Рис. 2. Расчетная схема

Для разбиения расчетной области используются треугольные конечные элементы с шестью компонентами узловых перемещений. Для многослойной трубы разбиение расчетной области делается таким образом, чтобы узлы конечно-элементной сетки приходились на границы слоев. В этом случае внутри каждого из конечных элементов механические характеристики определяются свойствами слоя, попавшего в этот элемент, и не претерпевают разрывов. Предполагается, что на границах раздела слоев адгезия идеальна.

Граничные условия:

На границах АВ и DC ставятся так называемые условия скольжения:  $v=0$ ,  $\sigma_r=0$ , где  $v$  – осевое смещение;  $\sigma_r$  – касательные напряжения.

На границе ВС:  $\sigma_n=\sigma_r=0$ , где  $\sigma_n$  – нормальные напряжения.

На границе AD:  $\sigma_n=P$ ,  $\sigma_r=0$ , где  $P$  – внутреннее давление.

Проверка программы осуществлялась сравнением результатов, полученных при расчете НДС однослойной полиэтиленовой трубы методом конечных элементов, с известными аналитическими решениями задачи Ламе. Результаты численного и аналитического решения показали достаточно хорошее совпадение значений эквивалентного напряжения и перемещений по толщине стенки трубы в пределах 3...5 %.

В качестве объекта исследования была выбрана труба Soluforce Classic. Характеристики трубы приведены в таблице [2, 5].

В результате расчета для трубы Soluforce была получена поверхность распределения эквивалентных напряжений (рис. 3). В осевом направлении значения напряжения в каждом слое трубы не меняются в связи с тем, что на трубу действует только внутреннее давление.

**Таблица.** Характеристики трубы Soluforce Classic

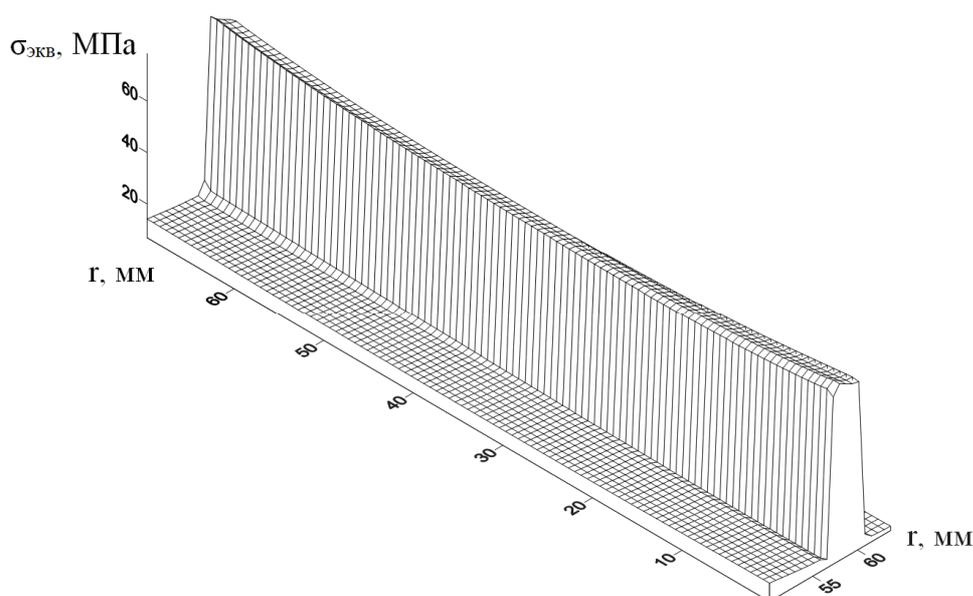
Наименование трубы	Soluforce M480 HPG		
Давление в трубе (максимально допустимое), МПа	6,5		
Внутренний диаметр, мм	100		
Наружный диаметр, мм	128		
Слой	внутренний	средний	наружный
Толщина слоя, мм	7,0	3,5	3,5
Материал слоя	ПЭ 100	Арамидная лента	ПЭ 100
Модуль упругости, МПа	1300	10 000	1300
Коэффициент Пуассона	0,43	0,30	0,43

Также для сравнения расчет НДС трехслойной трубы был произведен в программном комплексе ANSYS. Распределения эквивалентных напряжений ( $\sigma_{экв}$ ) и перемещений ( $v$ ) по толщине стенки трубы ( $\delta$ ), рассчитанные на основе разработанного алгоритма, а так же в ANSYS [6], показаны на рис. 4 и 5. Видно, что результаты двух расчетов различаются в пределах 5 %.

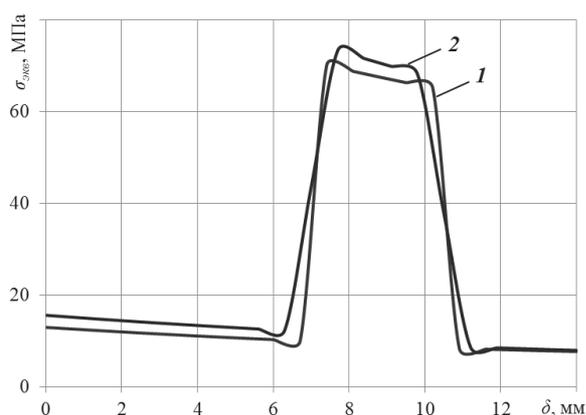
На рис. 4 наблюдается скачок эквивалентных напряжений среднего слоя из армирующей ленты, т. к. его модуль упругости много больше модуля упругости полиэтилена. Таким образом, максимальная нагрузка приходится на средний армирующий слой. Из рис. 5 видно, что градиент деформации в среднем слое меньше, чем в полиэтиленовом.

#### Выводы

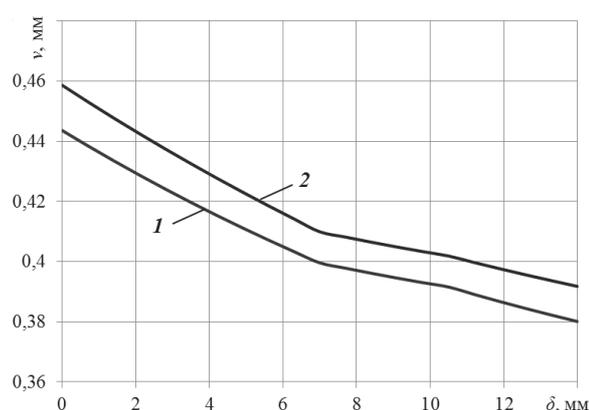
Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки многослойной армированной



**Рис. 3.** Поверхность эквивалентных напряжений по толщине стенки трубы



**Рис. 4.** Распределение эквивалентных напряжений по толщине стенки трубы, полученные на основе разработанного алгоритма (кривая 1) и в программном комплексе ANSYS (кривая 2)



**Рис. 5.** Распределение перемещений по толщине стенки трубы, полученные на основе разработанного алгоритма (кривая 1) и в программном комплексе ANSYS (кривая 2)

полимерной трубы показывает, что наибольшие значения напряжений имеет средний слой из армирующей ленты. Он воспринимает большую часть нагрузки и таким образом полностью выполняет задачу упрочнения трубы. Максимальные напряжения в полиэтиленовом слое составили 13 МПа, что значительно меньше предела текучести материала (20...25 МПа). Перемещения также незначительны, относительная деформация не превышает 1 %.

Предложенный метод оценки деформационно-прочностных свойств многослойных полимерных

труб может использоваться: при доработке нормативной документации по проектированию трубопроводных систем из полимерных материалов, при составлении таблиц и номограмм, с учетом современных требований, проверки прочности и устойчивости трубопроводов для различных материалов, давлений, осевых и изгибных нагрузок и других эксплуатационных факторов.

Кроме того, использование статистических данных о предельных прочностных характеристиках материала и о параметрах НДС позволит проводить оценку надежности трубопроводных систем.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Уиллоуби Д.А., Вудсон Д., Суверленд Р. Полимерные трубы и трубопроводы / пер. с англ. – СПб.: Профессия, 2010. – 486 с.
2. Pipelife Nederland B.V. // Soluforce® RTP. URL: www.soluforce.net (дата обращения: 17.10.2012).
3. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности / Пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
4. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. – М.: Мир, 1979. – 392 с.
5. Стручков А.С. Хладостойкость и особенности сопротивления разрушению нефтегазовых пластмассовых труб: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – Якутск, 2005. – 35 с.
6. Бурков П.В., Ключ О.В., Буркова С.П. Исследование напряженно-деформированного состояния подземных трубопроводов, проложенных в условиях вечной мерзлоты // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2011. – № 0В2. – С. 184–190.