

УДК 539.4

**РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ТРУБ С УЧЕТОМ НЕОДНОРОДНОСТИ
МАТЕРИАЛА**

**В.В. Можаровский¹, С.А. Марьин¹, Н.А. Марьина²,
С.В. Шилько³, Л.П. Кухорев³**

¹Гомельский государственный университет им. Ф. Скорины, Гомель

²Белорусский государственный университет транспорта, Гомель

³Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого НАН Беларуси, Гомель

**CALCULATION AND EXPERIMENTAL STUDY
OF STRESS-STRAIN STATE OF CYLINDRICAL PIPES
TAKING INTO ACCOUNT THE HETEROGENEITY OF THE MATERIAL**

**V.V. Mozharovsky¹, S.A. Marjin¹, S.A. Marjina²,
S.V. Shilko³, L.P. Kuhorev³**

¹F. Scorina Gomel State University, Gomel

²Belarusian State University of Transport, Gomel

³V.A. Belyi Metal-Polymer Research Institute National Academy of Sciences of Belarus, Gomel

Рассмотрена задача расчетно-экспериментального определения напряжений и перемещений композитных труб под действием гидростатического давления. С использованием ранее полученных теоретических зависимостей и алгоритмов разработан модуль конечноэлементного расчета напряженно-деформированного состояния трубы в виде полого цилиндрического тела неоднородной структуры. Экспериментальная часть работы включает механические испытания цилиндрических труб из армированных материалов. С использованием разработанного программного модуля изучено влияние армирующих волокон на концентрацию напряжений.

Ключевые слова: композитные трубы, армирование, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, механические испытания.

The problem of calculation and experimental determination of stresses and displacements of composite pipes under hydrostatic pressure is considered. Based on previously obtained theoretical relations and algorithms, the program module of finite-element calculation of stress-strain state of pipe which assumed as hollow cylindrical body with heterogenous structure, has been developed. Experimental part of study includes mechanical tests of cylindrical pipes made of reinforced materials. Using developed software, the influence of reinforcing fibers on the stress concentration has been studied.

Keywords: composite pipes, reinforcement, stress-strain state, finite element method, mechanical tests.

Введение

Достижения в области технологии производства легких и коррозионно-стойких трубопроводов из высокопрочных полимерных композитов в значительной степени связаны с расчетным прогнозированием оптимального наполнения полимерной матрицы армирующими волокнами или частицами. Применение методов механики композитов позволяет также обосновать геометрические и упругие характеристики функциональных слоев при изготовлении труб слоистой конструкции.

Если для оценки прочности и деформативности традиционных металлических трубопроводов пригодны относительно простые модели и методы сопротивления материалов с использованием справочных данных, то для проектирования полимерных композитных (неоднородных) труб необходимо использовать теорию

упругости анизотропного тела с последующей численной реализацией, а также проводить специальные экспериментальные исследования по определению комплекса механических характеристик указанных неоднородных и физически нелинейных материалов.

В настоящей статье приведены результаты расчетно-экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) композитных труб, использованные в хозяйственной тематике ИММС НАНБ.

1 О влиянии неоднородности материала на напряженно-деформированное состояние слоистой цилиндрической трубы

Поляризационно-оптическое исследование фрагмента армированной трубы на фотоупругой полимерной матрице выявляет сильную концентрацию напряжений, отображаемую

картиной изохром при прямом просвечивании (рисунок 1).



Рисунок 1 – Картина изохром при осевом сжатии композитной трубы (полиуретан, армированный стальной проволокой в форме спирали)

Однако указанный метод не позволяет определить НДС труб, изготовленных из большинства конструкционных полимерных материалов, не обладающих оптической прозрачностью и фотоупругостью. Малые размеры армирующих включений и толщины слоев затрудняют применение электротензометрии и других методов экспериментальной механики.

С целью расчета напряженно-деформированного состояния трубы из композиционного материала может быть рассмотрена ее модель в виде протяженного полого цилиндра (модель плоской деформации) или тонкого кольца (модель плоского напряженного состояния), с заданной на поверхности равномерно распределенной нагрузкой в виде гидростатического давления. Неоднородность упругих свойств материала учитывается путем макроскопического описания процесса деформирования на основе анизотропной теории упругости. Подразумевается, что модули упругости (радиальные и касательные) зависят от радиуса r и угла φ . Если свойства материала изменяются дискретно (труба слоистой конструкции), модули упругости представляют собой дискретные функции. Погрешность аналитического описания обусловлена неопределенностью в задании упругих свойств компонентов и параметров армирования (объемного содержания наполнителя, ориентации волокон, характеристик межфазного взаимодействия и т. д.). В этой связи прикладные методики расчета анизотропных конструкций из неоднородных материалов разработаны недостаточно. Так, в работе [1] предложено решение краевой задачи для изотропных цилиндров в одномерной постановке, когда модуль упругости меняется по радиусу цилиндра. Это решение требует компьютерной реализации и использования базы данных, содержащей полный набор

упругих характеристик матрицы и армирующих элементов.

Более адекватная оценка прочности и деформативности композитных труб включает вывод определяющих соотношений; численное решение, учитывающее реальную геометрию конструкции; проведение механических испытаний и экспериментальное определение упругих характеристик материала слоев; проведение расчета НДС и его экспериментальную проверку на образцах изделий. В частности, расчетно-экспериментальные исследования композитных подобных конструкций (трубопроводы, автомобильные шины) описаны авторами в работах [2]–[6].

Для успешной разработки методики расчета неоднородных труб ранее указанной конструкции рассмотрим пример численного расчета.

Пример расчета.

Постановка задачи. Исследовать напряженно-деформированное состояние неоднородной слоистой цилиндрической трубы, находящейся под действием внутреннего давления.

Допущения. При исследовании напряженно-деформированного состояния сделаем следующие допущения:

- труба лишена дна и имеет длину, значительно превышающую наружный диаметр ($l \gg d$);

- давление в трубе равномерно распределено по всей длине ($p = \text{const}$);

- геометрия слоистости и неоднородности (сечение) неизменна по всей длине трубы;

Исходные данные. Геометрические конструкционные особенности исследуемой слоистой неоднородной трубы показаны на рисунке 2.

Внутреннее давление $p = 7 \text{ МПа}$;

1-й слой трубы:

- внутренний радиус слоя – $r_1 = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- толщина – $h_1 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- технические характеристики материала: модуль упругости – $E_1 = 6,6 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона – $\nu_1 = 0,33$;

2-й слой трубы:

- внутренний радиус слоя – $r_2 = 21,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- толщина – $h_2 = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- технические характеристики материала: модуль упругости – $E_2 = 14 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона – $\nu_2 = 0,27$;

- характеристики неоднородного включения: диаметр – $d = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; модуль упругости – $E_2 = 200 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона – $\nu_2 = 0,27$;

3-й слой трубы:

- внутренний радиус слоя – $r_3 = 24,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

- толщина – $h_3 = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

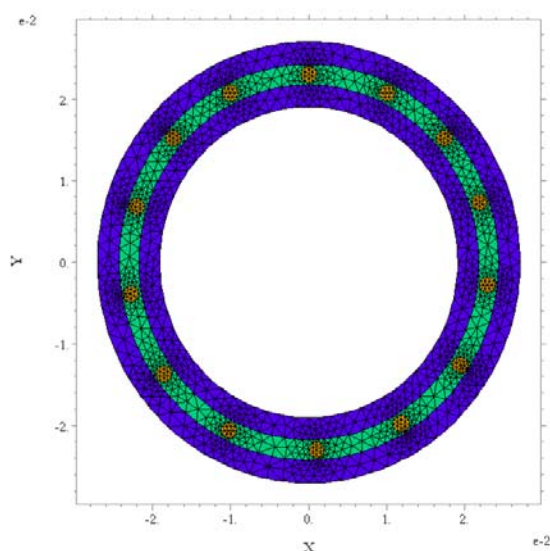
- технические характеристики материала:

модуль упругости – $E_3 = 6,6 \text{ ГПа}$; коэффициент Пуассона – $\nu_3 = 0,33$;

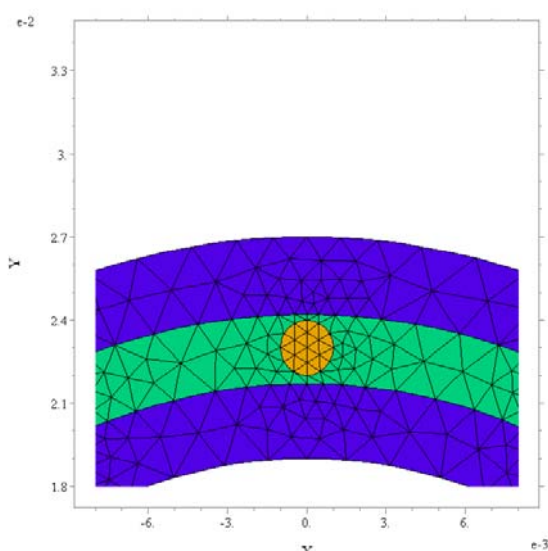
Методика проведения расчета. Расчет проведем с использованием аппарата конечно-элементного моделирования. Разбиение расчетной области производим нерегулярной сеткой, треугольными конечными элементами. Увеличение количества конечных элементов (процедура дробления) в местах концентрации напряжений

позволяет достичь наибольшей точности при расчетах.

Анализ результатов расчета. При проведении расчета исследуемая конструкция разбивалась на 6289 узлов, что позволило достичь точности $6,2 \cdot 10^{-5}$. Общая схема нерегулярной дискретизации представлена на рисунке 2а, укрупненная схема дискретизации в области, содержащей неоднородное включение отражена на рисунке 2б.



а) Общая схема



б) Фрагмент, содержащий включение

Рисунок 2 – Дискретизация расчетной области

На рисунке 3 представлена картина распределения напряжений σ_x . Здесь и далее напряжения представлены в фрагменте, содержащем неоднородное включение, в относительных величинах $\sigma' = \sigma / p$.

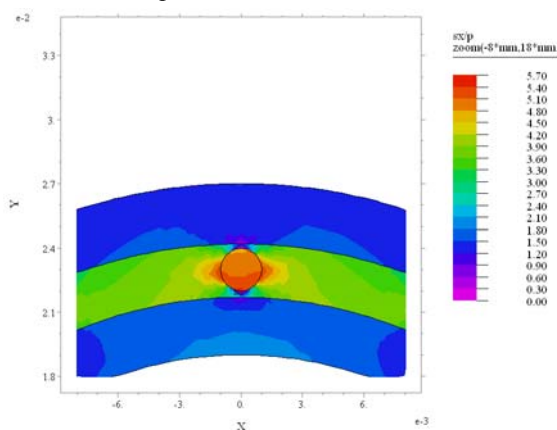


Рисунок 3 – Распределение напряжений σ_x

Максимальные значения напряжений σ_x сосредоточены в неоднородном включении (армирующем волокне) и в материале 2-го слоя (матрицы – материал заливки армирующих волокон) вблизи области контакта волокна с мат-

рицей и достигают значения $5,7p$, что более чем в два раза превышает значения напряжений на внутренней поверхности трубы.

При рассмотрении напряжений σ_y , представленных на рисунке 4, наблюдается характерный всплеск напряжений в области непосредственно под включением, а также на границе волоконно-матрица.

В самом волокне напряжения незначительны (абсолютная величина не превышает значения $0,3p$).

Напряжения σ_y принимают значения в следующем диапазоне: от $-1,4p$ до $1,4p$.

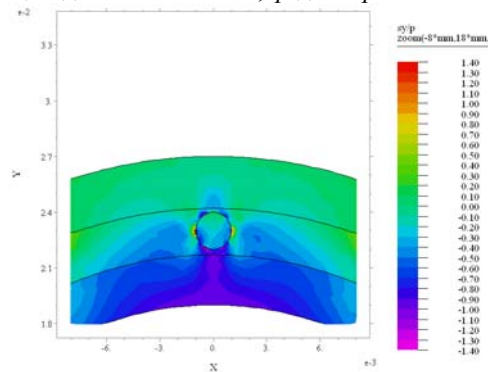


Рисунок 4 – Распределение напряжений σ_y

На рисунке 5 представлен график распределения полей касательных напряжений τ_{xy} , на котором четко прослеживается симметричный характер.

Комплексный анализ напряженного состояния цилиндрической слоистой трубы с включениями проведем с использованием оценки максимальных касательных напряжений $\tau_{\max}$, где

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}.$$

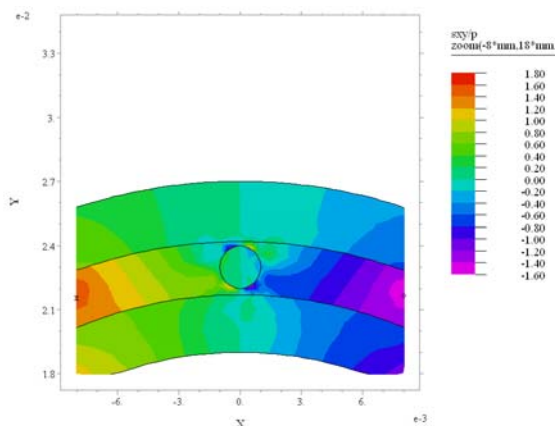


Рисунок 5 – Распределение касательных напряжений τ_{xy}

На рисунке 6 представлено распределение полей максимальных касательных напряжений $\tau_{\max}$.

Максимум максимальных касательных напряжений достигается во включении (армирующем волокне) и принимает значение равное $3,1p$. Наблюдаются также зоны концентрации пиковых напряжений и в матрице вблизи области контакта волокно-матрица.

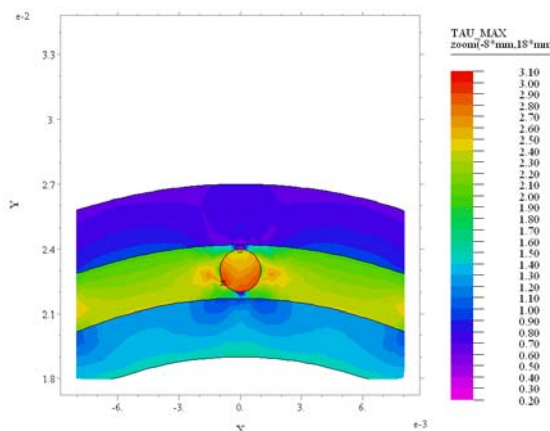


Рисунок 6 – Распределение напряжений $\tau_{\max}$

На внутренней поверхности слоистой трубы напряжения незначительны, составляют около $1,5p$.

Во внешней оболочке (слой – 3) также прослеживаются незначительные всплески, вызванные влиянием армирующего волокна (значение напряжений в диапазоне $0,2p - p$).

На рисунках 7, 8 изображено распределение перемещений u и v соответственно (m^{-5}).

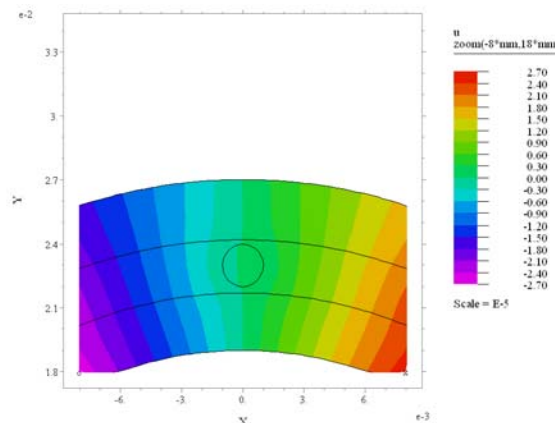


Рисунок 7 – Распределение полей перемещений u , m^{-5}

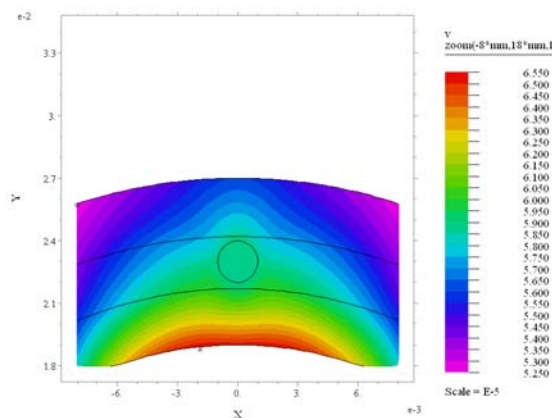


Рисунок 8 – Распределение полей перемещений v , m^{-5}

2 Экспериментальное исследование

Для определения физико-механических характеристик композитных труб была разработана методика экспериментального исследования (рисунок 9), которая успешно применяется при выполнении хозяйственных работ.

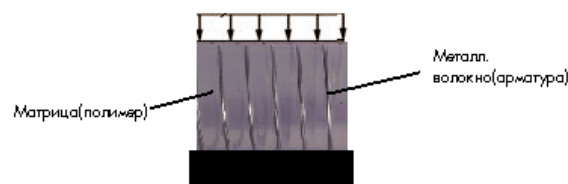


Рисунок 9 – Схема проведения испытания образца на сжатие по боковой поверхности.

Деформирование армированной трубы

С привлечением поляризационно-оптического метода проводились экспериментальные

исследования напряженного состояния при сжатии (рисунок 10) и изгибе (рисунок 11) армированной трубы на основе оптически прозрачного полимерного материала полиуретана с высокой оптической чувствительностью. Механические испытания на сжатие выполнялись на машине INSTRON 5567.

Показано, что для малых усилий связь «напряжения-деформация» носит практически линейный характер.

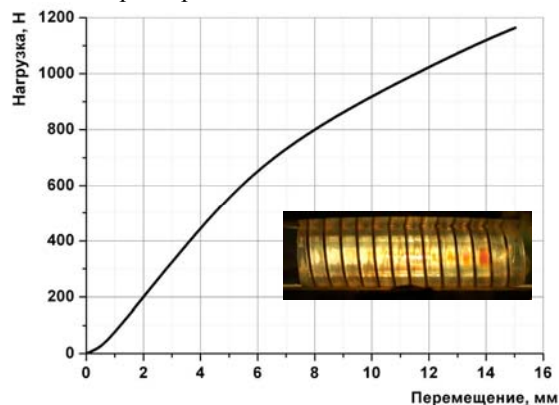


Рисунок 10 – Зависимость «сила – перемещение» при сжатии образца по боковой поверхности

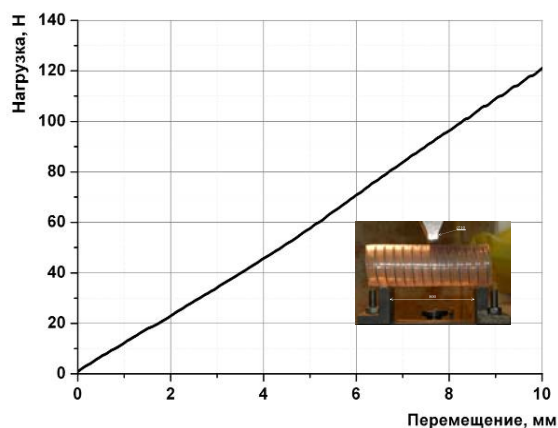


Рисунок 11 – Зависимость «сила – перемещение» в условиях трехточечного изгиба

Приведем некоторые особенности методики механических испытаний труб из композитов. Испытания проводятся для образцов, вырезанных из материала трубы вдоль оси и по меридиану. При заданных усилиях растяжения трубы определяются деформации на концах трубы на внутренней и внешней поверхности. Исходя из закона Гука, вычисляются напряжения и упругие константы. Для изотропной трубы методика нахождения констант упрощается путем использования уравнений, приведенных в [5].

С использованием описанных методик в ИММС НАН Беларуси в рамках договора И-69/2008 были определены механические характеристики трубчатых изделий на основе полиэтилена (рисунки 12, 13).



Рисунок 12 – Внешний вид композитной полиэтиленовой трубы-оболочки Ø560 мм (ООО «СарматТермо-Инжиниринг»).

Из натурных изделий (собственно трубы и соединительных термоусаживаемых муфт) вырезалось по 10 образцов в виде полосок, которые кондиционировались при температуре 23 ± 2 °С по ГОСТ 12423-66. Затем проводились испытания на машине Instron 5567. Относительное удлинение и предел текучести при разрыве определялись по ГОСТ 11262-80.



Рисунок 13 – Внешний вид композитной полиэтиленовой трубы-оболочки Ø315 мм (ЗАО «Завод полимерных труб»).

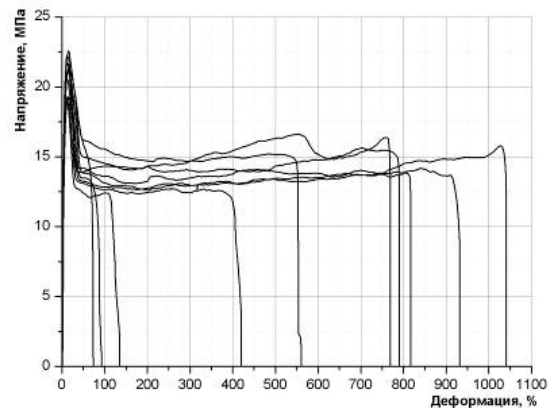


Рисунок 14 – Диаграмма «напряжение-деформация» при испытании образцов трубы Ø560 мм (ООО «СарматТермо-Инжиниринг»)

Исследования включали определение плотности по ГОСТу 15139-86, процентного содержания компонентов по ГОСТ 26311-84, определение показателя текучести расплава (ПТР), испытания на термоусадку, статические механические испытания, относительное удлинение и предел текучести при разрыве по ГОСТ 11262-80. На рисунке 14 представлены некоторые результаты механических испытаний.

Средние статические механические характеристики материала трубы-оболочки Ø560 мм (ООО «СарматТермо-Инжиниринг») следующие:

- модуль упругости, МПа – 447,49;
- деформация в момент текучести – 13,98%;
- предел текучести МПа – 13,15;
- деформация при разрыве, 562,93%.

Установлено, что средняя величина относительного удлинения при разрыве материала полиэтиленовой трубы-оболочки Ø560 мм (поставщик ПИ-трубы ООО «СарматТермо-Инжиниринг») составляет 562,93 %, что соответствует документу о качестве. Средняя величина относительного удлинения при разрыве материала полиэтиленовой трубы-оболочки Ø315 мм (поставщик ПИ-трубы ЗАО «Завод полимерных труб») составляет 542,04%, что соответствует паспорту о качестве №2018, а предел текучести при растяжении составляет 12,27 МПа, что не соответствует сертификату о качестве №2018. Средняя величина относительного удлинения при разрыве материала муфты полиэтиленовой термоусаживаемой Ø200 мм (поставщик ЗАО «Завод полимерных труб») составляет 841,03%, что соответствует сертификату качества №43. Величина относительного удлинения при разрыве материала муфты полиэтиленовой термоусаживаемой Ø560 мм (поставщик ООО «СарматТермо-Инжиниринг») составляет 625,67%, что соответствует документу о качестве.

Заключение

На основе построенных в работе численных и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

– в материале волоконно-армированной трубы волокна воспринимают основную нагрузку и тем самым разгружают матричный материал;

– оптимальный состав и количество элементов армирования определяется специальным расчетом;

– зоны концентрации напряжений вблизи контакта «волоконно-матрица» являются критическими и необходимо их определение для конкретных материалов и конструкций;

– для качественной оценки эксплуатируемых труб необходимо проведение комплексных испытаний композитов и входящих в него компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев, В.И. Некоторые задачи и методы механики неоднородных тел / В.И. Андреев. – М.: АСБ, 2002. – 288 с.
2. Марьин, С.А. Напряженно-деформированное состояние слоистой трубы из ортотропных материалов / С.А. Марьин, В.В. Можаровский // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2004. – Т. 9, № 3. – С. 16–21.
3. Марьин, С.А. Влияние конструкционных параметров футерованных труб из композиционных материалов на их напряженно-деформированное состояние / С.А. Марьин, В.В. Можаровский // Полимерные композиты и трибология «ПОЛИКОМТРИБ-2005»: Тез. докл. междунаучной конф. – Гомель, 2005. – С. 33–34.
4. Напряженно-деформированное состояние композиционных трубопроводов с покрытиями / В.В. Можаровский [и др.] // Materialy II Symposjum Mechaniki Zniszczenia Materialow I Konstrukcji. – Augustow, 2003. – С. 255–258.
5. Шилько, С.В. Численное моделирование напряженного состояния автомобильной шины / С.В. Шилько, С.Б. Анфиногенов, А.В. Хотько // Теоретическая и прикладная механика. – 2007. – № 22. – С. 297–303.
6. Инженерная методика расчета и экспериментальное определение механических характеристик композитных труб при повышенной температуре / Л.П. Кухорев [и др.] // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2009. – Т. 14, № 3. – С. 8–13.

Поступила в редакцию 02.11.09.