

В диссертационный совет Д 002.024.03  
Федерального государственного бюджетного  
учреждения науки Институт прикладной  
математики им. М.В.Келдыша Российской  
академии наук.

125047, Москва, Миусская пл., д.4

### **ОТЗЫВ**

**официального оппонента о диссертации Яковлева Максима  
Яковлевича «Моделирование эффективных механических  
характеристик резинокорда при конечных деформациях»,  
представленной на соискание учёной степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 05.13.18 «Математические  
модели, численные методы и комплексы программ»**

В диссертационной работе М.Я. Яковлева «Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях» предлагается способ оценки эффективных механических характеристик резинокордных композитов в нелинейной форме, при конечных деформациях с помощью численного моделирования. Тема диссертации является **актуальной** в силу широкого использования резинокордных материалов в шинной промышленности, в том числе для разработки новых типов пневматических шин.

В диссертации эффективные механические характеристики резинокорда оценивались с помощью проведения численных конечноэлементных расчётов на представительном объёме. На основе результатов нескольких серий численных расчётов эффективных свойств исследовались зависимости эффективных свойств резинокорда от упругих свойств резины и корда, а также от геометрической структуры материала. Были построены графики этих зависимостей, а также дана оценка величины поправки вследствие учёта нелинейных эффектов при вычислении эффективных свойств резинокорда.

**Основными результатами** диссертационной работы являются:

- 1) модификация математической модели резинокордного композита и методики оценки его эффективных свойств;
- 2) разработка на основе методики алгоритма численного расчёта эффективных свойств резинокорда при конечных деформациях;
- 3) разработка программного модуля для оценки эффективных свойств резинокорда при конечных деформациях;
- 4) результаты численных экспериментов, показывающие влияние на эффективные свойства резинокорда упругих модулей резины и корда, а также геометрической структуры материала.

Данные результаты являются **новыми**. Они обладают несомненной **практической значимостью**, поскольку могут быть использованы при расчёте напряжённого состояния пневматической шины с учётом геометрической и физической нелинейности деформаций, а также при прочностных расчётах прочих конструкций из резинокорда.

Полученные в диссертационной работе результаты являются **достоверными**. Это подтверждается использованием корректных математических соотношений, базовых понятий нелинейной теории упругости, общепризнанных численных методов. В работе приведены сравнения полученных численных результатов с рядом аналитических решений. Наблюдается совпадение с хорошей точностью.

**Язык** диссертации и автореферата – грамотный, логически стройный, понятный.

Объём диссертации составляет 126 страниц. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы из 94 источников и двух приложений.

Во *введении* даётся определение резинокордного композита, приводится обзор литературы по исследованию эффективных механических характеристик композиционных материалов и отдельно по исследованию

эффективных характеристик резинокорда. Описаны цели работы, актуальность, научная новизна и практическая значимость исследования, апробация работы. Обоснована достоверность полученных результатов.

В *первой главе* приводятся основные обозначения и соотношения нелинейной теории упругости, используемые в работе в дальнейшем.

Во *второй главе* приводится определение эффективных механических характеристик композита. Описываются методика и алгоритм численной оценки эффективных свойств резинокорда (с учётом его особенностей) при конечных деформациях.

*Третья глава* содержит результаты верификации численных результатов, полученных с помощью разработанного в процессе исследования программного модуля для оценки эффективных свойств резинокорда.

В *четвёртой главе* описываются результаты численных экспериментов, посвящённых исследованию зависимости эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях от механических свойств резины и корда и от геометрических параметров структуры резинокорда.

В *заключении* сформулированы основные результаты и выводы, полученные автором диссертационной работы.

### **Замечания**

- 1) В постановке задачи нелинейной упругости для представительного объема на с. 30 уравнение равновесия записано в координатах конечного состояния, а граничные условия сформулированы на границе этого объема в недеформированном состоянии.
- 2) При описании видов тензора деформаций Грина эффективного материала, которые используются для различных последовательностей задач (с. 31,

32), было бы целесообразно пояснить, что все компоненты этого тензора, не равные  $q$ , равны нулю.

Указанные недостатки не снижают положительную оценку работы в целом.

### Заключение

Диссертация М.Я. Яковлева является законченной научно-квалификационной работой. Результаты исследований М.Я. Яковлева публиковались в научных журналах из списка ВАК и докладывались на ведущих научных и научно-технических конференциях. Содержание автореферата полностью соответствует содержанию диссертации.

Диссертационная работа соответствует всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 «Математические модели, численные методы и комплексы программ». А её автор, Яковлев Максим Яковлевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Официальный оппонент

доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий кафедрой  
математического моделирования  
федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Тверской государственной университет»  
170100, г. Тверь, ул. Желябова, 33.

Тел. +7-4822-580-522 (доб. 120)

E-mail: p000149@tversu.ru

*А. Кудинов* Кудинов Алексей  
Никифорович

13.01.2019г



*М.Я. Яковлева*