

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

дата защиты « 19 » марта 2015 г., протокол № 5

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.024.03 НА БАЗЕ  
ИНСТИТУТА ПРИКЛАДНОЙ МАТЕМАТИКИ им. М.В. Келдыша РАН ПО  
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА  
ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

**Яковлева Максима Яковлевича**, гражданина Российской Федерации, ведущего специалиста с функциями программиста-алгоритмиста, сектор прочностного моделирования ООО «Фидесис». В 2009 году соискатель окончил Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова (МГУ имени М.В. Ломоносова), механико-математический факультет, кафедру вычислительной механики, ему присуждена квалификация механик по специальности "Механика". Соискатель обучался в аспирантуре механико-математического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова с 2009 по 2012 годы.

Диссертация «Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях», в виде рукописи, по специальности 05.13.18 — математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, выполнена на кафедре вычислительной механики механико-математического факультета ФГБОУ ВПО «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова».

Диссертация принята к защите 22 мая 2014 г., протокол № 8. диссертационным советом Д002.024.03 на базе ФГБУН Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, 125047, Москва, Миусская пл., д.4, приказ №105/нк от 11 апреля 2012 года.

**Научный руководитель** – доктор физико-математических наук Левин Владимир Анатольевич, федеральное государственное бюджетное

образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», механико-математический факультет, кафедра вычислительной механики, профессор.

**Официальные оппоненты:**

1. Лурье Сергей Альбертович – профессор, доктор технических наук, заведующий лабораторией «Неклассические модели механики композитных материалов и конструкций» Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института прикладной механики РАН;

2. Кудинов Алексей Никифорович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой математического моделирования Тверского государственного университета;

дали положительные отзывы на диссертацию.

**Ведущая организация** – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН), г. Владивосток, дала положительное заключение (заключение составлено зав. лабораторией механики необратимого деформирования ИАПУ ДВО РАН, д.ф.-м.н. Ковтанюк Ларисой Валентиновной). В своем положительном заключении ведущая организация указала, что « ... не вызывает сомнений **актуальность** темы диссертационной работы ... результаты являются **новыми** и соответствуют паспорту специальности «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». **Научная значимость** работы заключается в модификации математической модели резинокорда и методики оценки его эффективных свойств при конечных деформациях с учётом слабой сжимаемости резины. **Практическая значимость** заключается в разработке алгоритма и программного модуля, которые могут быть использованы для исследования эффективных свойств резинокорда, используемого при производстве пневматических шин и других резинокордных изделий: шлангов высокого давления, рукавов, манжет, дорожных покрытий и т.п. Этот программный модуль входит в состав

программного комплекса для инженерного прочностного анализа. Важным с точки зрения практического применения является учёт конечности деформаций при оценке эффективных свойств – поскольку изделия из резинокорда испытывают такие деформации. Практическое значение имеет и выполненное в диссертации исследование зависимости эффективных свойств резинокорда от модулей упругости резины и корда и от структуры композита. Замечания: 1) Для однозначного определения компонент аффинора деформаций (тензора дисторсии) через компоненты тензора деформаций Грина аффинор задаётся верхнетреугольным (стр. 33 диссертации). Почему именно такой? Было бы целесообразно привести какие-либо пояснения. 2) В диссертации не указаны численные значения параметров  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ , характеризующих модифицированные последовательности задач (стр. 35, 36). Данные замечания не снижают положительную оценку работы в целом и не ставят под сомнение её высокое качество».

На автореферат диссертации поступило 7 отзывов от директора ООО «НТЦ «Интайр» Д.Б. Голубева и его заместителя по науке Юсупова А.А., к.ф.-м.н., н.с. Данилова А.А. (ИВМ РАН), д.ф.-м.н., профессора Соловьёва М.Е. (Ярославский ГТУ), д.ф.-м.н., профессора Шоркина В.С. (ОрёлГТУ), д.т.н., ведущего специалиста «ЛЮйл НЕФТЕХИМ» Соколова С.Л., д.т.н., г.н.с. «ООО Веском НИЦШП» Веселова И.В., и от д.ф.-м.н., и.о. зав. кафедрой ФГБОУ «Комсомольский-на-Амуре ГТУ» Бормотина К.С. Все отзывы положительные, все из них содержат замечания.

В отзыве от Д.Б. Голубева и А.А. Юсупова сказано, что « ... Актуальность данной задачи не вызывает сомнений, поскольку отечественный программный комплекс CAE FIDESYS нуждается в развитии базы материалов и подходов к моделированию. Отсюда высокая практическая значимость проведенных исследований. В автореферате четко сформулированы цели и задачи работы, выбранные методы исследований вполне корректны, выполнен значительный объем теоретических исследований. Разработанные и предложенные автором математические

модели позволили автору создать работоспособную методику расчета физико-механических характеристик анизотропных композиционных материалов. Выводы, сделанные по работе, сомнений не вызывают. Работа представлена в законченном виде. По автореферату можно сформулировать следующие замечания: 1) В ряде пакетов МКЭ (например, Abaqus) реализована возможность задавать свойства резинокордных композитов путем использования REBAR - элементов, когда слой, несущий силовую нагрузку, внедряется в резиновую матрицу. При этом свойства резины и корда (угол закроя, частота нитей, диаметр нити и т.д.) задаются пользователем отдельно, без предварительного вычисления суммарных эффективных свойств композита. Проведение сравнения полученных результатов с данными пакетами повысило бы степень валидации программного кода. 2) Автор определяет достоверность результатов путем верификации с аналитическими решениями. Но эти решения являются приближёнными, и совпадение с ними может говорить о качественной достоверности, в то время как количественная достоверность определяется точностью получения этих решений. Отмеченные недостатки не снижают в целом общего положительного впечатления о работе, ее научной и практической значимости. Диссертационная работа Яковлева М.Я. соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 - «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В отзыве А.А. Данилова сказано, что « ... тема диссертации, несомненно, является **актуальной**. **Научная новизна** проведённых в работе исследований заключается в модификации методики и разработке алгоритма для оценки эффективных свойств резинокорда с учётом испытываемых им конечных деформаций и слабосжимаемости резины, входящей в его состав. Автором был разработан программный модуль, позволяющий численно оценивать эффективные характеристики резинокорда, с помощью которого

проведены численные эксперименты, показавшие зависимость свойств резинокорда от механических параметров резины и корда, а также от геометрии резинокорда. Был сделан вывод о необходимости учёта нелинейности при описании свойств резинокордного композита.

**Практическая значимость** проведённых исследований заключается в возможности использования разработанного алгоритма и программного обеспечения для численного моделирования свойств резинокорда на стадии проектирования и разработки изделий, в которых используется резинокордный материал. Практическая значимость подтверждается использованием авторского программного модуля в составе российской САЕ-системы «Фидесис»... Замечания: 1) В тексте работы не указано, какие сеточные элементы и базисные функции использовались в численной МКЭ схеме. 2) Было бы полезно провести более подробный анализ численной сеточной сходимости и оценить скорости сходимости. Сделанные замечания не снижают общего положительного впечатления о работе в целом. Считаю, что диссертационная работа М.Я. Яковлева соответствует всем требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения учёных степеней ВАК Минобрнауки РФ и паспорту специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», а её автор, Яковлев Максим Яковлевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по указанной специальности». В отзыве М.Е. Соловьёва сказано, что «...В диссертационной работе модифицирована математическая модель резинокордного композита и методика оценки его механических характеристик с учётом конечности деформаций и слабой сжимаемости резины. Разработан алгоритм оценки эффективных констант упругости материала в приближении параболической модели нелинейной упругости. В результате численных экспериментов сделаны выводы о влиянии механических характеристик резины и корда и параметров укладки нитей на эффективные константы упругости. *По автореферату диссертации имеется замечание.* Судя по представленным результатам в задаче №4 в

работе исследовано влияние угла наклона нитей корда в двуслойном композите при одинаковом значении угла в слоях. Вместе с тем, на практике используется в основном случай, когда нити расположены перекрестно, так что углы наклона нитей в разных слоях отличаются. Представляло бы интерес изучить также и этот случай. Указанные замечания не снижают общей положительной оценки работы...». В отзыве В.С. Шоркина сказано, что « ...Представленные результаты являются новыми. Предложенная математическая модель содержит новые соотношения по определению эффективных характеристик материала, обобщающие аналогичные существующие на случай учета конечных деформаций материала при условии его слабой сжимаемости. Достоверность полученных результатов подтверждена... Практическая значимость следует из результатов четвертой главы диссертации... Замечания: 1) Необходимо разделить цель диссертации и задачи, решаемые для ее достижения. 2) Условие, на основании которого определяются эффективные свойства композита было бы уместно записать в аналитическом виде, инвариантном по отношению к выбору формы представительного объема. 3) В настоящее время большое внимание уделяется адгезионной прочности соединения элементов наполнителя и материала матрицы. В связи с этим уместно учесть влияние этого обстоятельства на эффективные свойства композита в рамках предложенной модели по крайней мере в крайних случаях, когда адгезия есть и когда ее нет. Диссертация Яковлева Максима Яковлевича является научно-квалификационной работой, в которой решена важная для развития математического моделирования нелинейно деформируемых анизотропных материалов задача модификации методики оценки эффективных механических характеристик композитных материалов для случая конечных деформаций на тот случай, когда они имеют структуру, сходную с резинокордом – конструкцией из нескольких слоев резины, армированных параллельными металлическими или текстильными нитями». В отзыве С.Л. Соколова сказано, что «Диссертационная работа Яковлева М.Я.

посвящена важной и актуальной теме определения эффективных механических характеристик резинокордных материалов для применения в расчётах различных технических объектов. Делается попытка учёта нелинейных свойств резины и конечных деформаций резины. Это важно при расчётах напряжённо-деформированного состояния изделий из резинокордных материалов (например, пневматических шин), т.к. подробный учёт резинокордной структуры требует её максимальной детализации, что приводит к сложным и трудоёмким вычислительным моделям... К работе имеются следующие замечания: 1) В автореферате (и в тексте диссертации) отсутствуют сравнительные данные фактических (экспериментальных) кривых растяжения однослойных и многослойных резинокордных образцов и расчётных, полученных по предлагаемой методике. 2) Для построения методики использована гипотеза однородного распределения деформаций по резинокордным образцам, в то время как при деформировании резинокордных образцов наблюдается существенно неоднородное распределение деформаций, в особенности между нитями корда. Насколько это может увеличить погрешность предлагаемой методики, и для каких видов нагрузок. 3) Учёт конечных деформаций резины существенен при их величинах свыше 50-100% (относительные удлинения 0,5-1,0 и выше), насколько велика погрешность расчёта эффективных механических характеристик резинокордного композита при отсутствии учёта конечных деформаций. В целом диссертационная работа «Моделирование эффективных характеристик резинокорда при конечных деформациях» выполнена на высоком научном уровне, а её автор Яковлев Максим Яковлевич заслуживает присвоения учёной степени кандидата физико-математических наук». В отзыве И.В. Веселова сказано, что «... Задача расчёта напряжённо-деформированного состояния (НДС) в резинокордных деталях пневматической шины до настоящего времени не решена с точностью, позволяющей прогнозировать поведение шины в условиях реальной эксплуатации. Имеющиеся пакеты программ являются know how

фирм – производителей шин и не продаются на мировом рынке. Основная причина такого положения – высокая сложность конструкции шины, конечные деформации её элементов и существенно нелинейные зависимости термомеханических свойств от деформации и скорости деформации. В связи со сказанным, попытки адекватного описания НДС резинокордных слоёв как анизотропных однородных материалов с учётом разных типов определяющих уравнений резины и свойств корда представляются актуальными и с научной, и с прикладной точек зрения... Замечания по работе: 1) Желательно, для возможности практического применения в промышленности полученных результатов, в дальнейшем провести кроме верификации валидацию кода с использованием достоверных экспериментальных данных или указать необходимые эксперименты. 2) В качестве определяющих уравнений использован материал Муни и материал Мурнагана. Желательно обобщить полученные результаты на несжимаемые материалы и другие типы слабосжимаемых. В этом случае практическая ценность работы значительно бы возросла. Данные замечания не меняют общего положительного впечатления от проведенных исследований и достигнутого научного результата. При проведении работ, указанных в п.1 и п.2, полученные результаты могут найти промышленное применение при проектировании и опытном производстве шин для тяжелой техники, проводимых в ООО «НПКЦ ВЕСКОМ». Автор хорошо известен специалистам шинной отрасли по своим докладам на симпозиумах «Проблемы шин и резинокордных композитов». Материалы диссертации с достаточной полнотой отражены в приведенных публикациях. Выводы соответствуют содержанию автореферата. На основании изложенного можно заключить, что диссертация **«Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях»** соответствует требованиям п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК Минобрнауки РФ от 24 сентября 2013 г № 842, а ее автор, Яковлев Максим Яковлевич заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата

физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В отзыве К.С. Бормотина сказано, что «По содержанию автореферата имеются некоторые вопросы и замечания. 1) В автореферате говорится о необходимости моделирования шины в области пятна контакта шины с поверхностью. Проводилось ли это моделирование? Какая в этом случае конечно-элементная модель? Какие граничные условия? 2) М.Я. Яковлев проводит расчёты методом конечных элементов в системе САЕ, но не представлены конечно-элементные уравнения для рассматриваемых задач и не указаны алгоритмы решения для случаев малых и конечных деформаций. Какие конечноэлементные модели и конечные элементы использовались в расчётах? Данные замечания не снижают научную и практическую ценность диссертационной работы М.Я. Яковлева. Диссертационная работа Яковлева Максима Яковлевича «Моделирование эффективных механических характеристик резинокорда при конечных деформациях» отвечает требованиям ВАК, предъявляемым к кандидатским диссертациям, её автор Яковлев М.Я. заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Основные результаты диссертации опубликованы в 25 научных журналах и изданиях, из которых 3 входят в перечень рецензируемых научных журналов и изданий. Основные работы:

1. Гамлицкий Ю.А., Левин В.А., Филиппенко Е.В., Яковлев М.Я. К вопросу о постановке задачи расчета поля напряжений элементарной ячейки эластомерного нанокompозита // Каучук и резина, №4, 2010. – С. 22–25.

2. Яковлев М.Я. О численной оценке эффективных механических характеристик резинокордных композитов // Вестник Тверского государственного университета. Серия: Прикладная математика №17, 2012. – С. 29-40.

3. Яковлев М.Я., Янгирова А.В. Метод и результаты численной оценки эффективных механических свойств резинокордных композитов для случая двухслойного материала [Электронный ресурс] // Инженерный вестник Дона, №2, 2013. – Режим доступа: <http://ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1639>

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований были разработаны математические модели и получены зависимости эффективных механических характеристик резинокордного композита от механических свойств резины и корда, а также от геометрической структуры резинокорда. В частности, модифицирована математическая модель резинокорда и предложена методика оценки его эффективных механических характеристик, при модификации методики доказана необходимость учета конечности деформаций, а также «слабосжимаемости» резины, входящей в состав резинокорда. На основе модифицированной методики был разработан алгоритм численной оценки эффективных характеристик резинокорда при конечных деформациях, а на основе алгоритма – программный модуль на языке C++. Были проведены численные эксперименты по оценке влияния на эффективные характеристики механических и геометрических параметров композита.

Полученные методика и алгоритм могут быть использованы для численных прочностных расчётов пневматической шины как цельной конструкции. Разработанный программный модуль может быть использован для оценки эффективных механических характеристик как резинокорда, так и других анизотропных композитных материалов. Результаты диссертационной работы могут быть использованы в МГУ им. Ломоносова, МФТИ, НИЯУ МИФИ, МГТУ им. Баумана, ИПМ им. Келдыша РАН, ООО «НТЦ НИИШП», ООО «НТЦ Интайр», ООО «НИИЭМИ» и в других организациях, занимающихся математическим моделированием механических свойств композитных материалов.

Достоверность полученных результатов гарантируется строгостью математической постановки задачи, использованием апробированных

соотношений теории упругости при конечных деформациях, применением общепризнанных численных методов и подтверждается результатами численных расчётов тестовых задач.

Личный вклад соискателя состоит в модификации математической модели резинокорда и методики оценки его эффективных механических характеристик; разработке алгоритма и программного модуля для такой оценки; проведении численных расчётов и анализе их результатов.

Диссертация охватывает все основные вопросы поставленной научной задачи, является целостным и законченным научным исследованием.

Диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация Яковлева М.Я. представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, и принял решение присудить Яковлеву Максиму Яковлевичу ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 4 доктора по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 17, против нет, недействительных бюллетеней нет.

Заместитель председателя  
диссертационного совета  
Д 002.024.03, д.ф.-м.н., профессор



Тишкин Владимир Фёдорович

Учёный секретарь диссертационного  
Совета Д 002.024.03, д.ф.-м.н.

Змитренко Николай Васильевич

«20» марта 2015 года