



Акционерное общество  
"НАУЧНО-  
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ИНСТИТУТ  
ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ"  
(АО "НИИПМ")

08.11.2017 № 026-06/386

«УТВЕРЖДАЮ»

Генеральный директор  
Акционерного общества  
«Научно-исследовательский институт  
полимерных материалов»  
(АО «НИИПМ»)

Голубев А.Е.

2017 г.



Л.Б.Макаров  
Пр.№ 1095 от 14.11.17

О Т З Ы В

ведущей организации  
Акционерного общества «Научно-исследовательский институт  
полимерных материалов»  
на диссертацию Янкина Андрея Сергеевича  
**«Деформационные свойства высоконаполненных вязкоупругих полимеров  
при двухчастотных законах нагружения»,**  
представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук  
по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

**Актуальность темы** диссертационной работы Янкина А.С. определяется необходимостью изучения физико-механических свойств высоконаполненных полимерных композитов, используемых при разработке смесевых твердых топлив и зарядов из них, при воздействии на них двухчастотными гармоническими нагрузками. Во всем жизненном цикле изделия из твердого топлива испытывают сложные динамические нагрузки: многочастотные внутрикамерные пульсации, биения, транспортировочные нагрузки, переходные процессы и т.д. Исследования, проведённые Янкиным А.С., вызваны необходимостью расчета твёрдотопливных зарядов при подобных воздействиях. При этом материалы данного вида обладают существенными нелинейными физико-механическими свойствами при деформировании. В таких случаях становиться неприемлемым

использование принципа суперпозиции при решении задач о напряжённо-деформированном состоянии (НДС). В связи с этим актуальной становится необходимость совершенствования моделей описания поведения подобных материалов (связанных с видом нагружения), изучения закономерностей их деформирования при нагрузках близких к эксплуатационным. Не менее важным является решение методических вопросов, связанных с постановкой новых экспериментов, и развитие методик параметрической идентификации.

Автор работы предлагает ограничиться двумя наиболее энергонесущими гармониками и ставит перед собой цель разработать методы проведения двухчастотных экспериментов, математические модели описания динамических деформационных свойств высоконаполненных полимеров при таких нагрузках, методику определения параметров моделей и процедуру их идентификации для расчёта НДС ракетных двигателей на твердом топливе.

**Структура и содержание работы.** Диссертация Янкина А.С. состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 141 наименование, изложена на 136 страницах машинописного текста, содержит 52 рисунка, 14 таблиц и 1 приложение. В диссертационной работе прослеживается логика, содержание диссертации соответствует ее целям и задачам. Диссертация изложена грамотным техническим языком.

**Во введении** сформулированы актуальность исследования, его цели и задачи, научная новизна, практическая значимость, достоверность полученных результатов, сформированы положения, выносимые на защиту, представлены сведения о личном вкладе автора, его публикациях, апробации работы и изложено краткое содержание работы.

**В первой главе** приведен обзор работ российских и зарубежных авторов, связанных с исследованиями физико-механических свойств наполненных эластомеров и нагрузок, действующих на изделия из них, разработкой моделей описания вязкоупругого поведения материалов. Обсуждены дискуссионные вопросы. Сформулирована постановка исследования.

**Во второй главе** рассмотрены основные математические модели для описания механического поведения вязкоупругих материалов при стационарных гармонических воздействиях, развит комплексный подход к построению моделей описания деформирования высоконаполненного полимера при двухчастотных нагрузках на основе интегрального ряда Вольтерры. Рассмотрено три подхода: линейный, нелинейный с учетом второго члена ряда Вольтерры и нелинейный с учетом второго и третьего членов. Приведено описание разработанных и реализуемых методик проведения двухчастотных экспериментальных исследований и определения вязкоупругих параметров высоконаполненных полимеров.

**Третья глава** посвящена преимущественно экспериментальным исследованиям, а также анализу полученных данных. В работе представлены результаты экспериментов, которые были проведены в условиях различных температур и частот нагружения. Выявлены закономерности механического поведения высоконаполненного полимера в условиях разнообразных одночастотных и двухчастотных нагрузок с использованием температурно-временной аналогии.

**Четвертая глава.** На основании анализа экспериментальных данных, представленных в третьей главе, разработаны полиномиальные уравнения, описывающие зависимости вязкоупругих параметров от различных факторов пространства (частот и температуры). Разработан композиционный многофакторный план, по опытным данным которого определены коэффициенты полиномов с использованием процедуры оптимизации по алгоритму покоординатного спуска. Проанализирована возможность использования разработанных уравнений путем оценки их адекватности по критерию Фишера. Представлены результаты сравнения линейной и нелинейных моделей с результатами проверочных экспериментов. Даны рекомендации по использованию моделей в зависимости от степени нелинейности свойств материала и действующих нагрузок.

**В заключении** содержатся основные результаты, выводы и рекомендации диссертационной работы, которые подтверждают выполнение поставленных задач и цели.

#### **Научная новизна:**

– Представлены методики проведения экспериментальных исследований при двухчастотных нагрузлениях и определения вязкоупругих параметров материала с помощью разложения в ряд Фурье входных и выходных сигналов.

– Получены новые экспериментальные данные о физико-механических свойствах высоконаполненного полимера для широкого диапазона изменения двухчастотных нагрузок, которые подтвердили эффекты влияния двух гармоник нагружения друг на друга вследствие механической нелинейности.

– Разработаны многофакторные полиномиальные нелинейные модели поведения материала, которые обладают большей точностью описания по сравнению с подходом линейной суперпозиции двух гармоник (без учета взаимовлияния), а также даны рекомендации к использованию моделей.

– Разработана процедура идентификации предложенных моделей вязкоупругого поведения материала.

**Научная и практическая значимость.** Теоретическая значимость работы заключается в построении нелинейных моделей деформирования высоконаполненных полимеров при различных двухчастотных нагрузлениях, что

вносит весомый вклад в развитие теории прикладной вязкоупругости в области выявления законов деформирования материалов. Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке подходов и методик, позволяющих проводить эксперименты и определять константы нелинейных моделей вязкоупругого поведения наполненных полимеров. Представленные модели могут быть использованы в конечно-элементных пакетах для проведения расчета реальных вязкоупругих конструкций. Полученные результаты позволяют их использовать при разработке математического аппарата и аналогичных подходов для изучения динамических деформационных свойств материалов при более сложных гармонических нагрузках. Результаты, приведенные в работе, имеют существенное значение для развития отрасли технических наук в области механики деформируемого твёрдого тела.

Результаты, рекомендации и выводы диссертации Янкина А.С. могут использоваться в учебных, исследовательских и промышленных целях в таких организациях, как Федеральный центр двойных технологий «Союз» (Дзержинский), Научно-производственное объединение «Искра» (Пермь), Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (Санкт-Петербург), Бийский технологический институт АлтГТУ им. И.И. Ползунова (Бийск), Казанский Национальный Исследовательский Технический Университет им. А.Н. Туполева (Казань), Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова (Ижевск), Московский авиационный институт имени М.В. Ломоносова (Москва), Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (Москва), Омский государственный технический университет (Омск), Оренбургский государственный университет (Оренбург), Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Самара), Южно-Уральский государственный университет (Челябинск) и др.

Представленные в работе результаты проверены экспериментально. Показано хорошее соответствие результатов расчета и эксперимента. Разработанные нелинейные модели сравнены друг с другом и с линейным подходом. Результаты сравнения показали предпочтительность использования нелинейных математических моделей перед линейной, в результате чего выданы рекомендации к использованию нелинейных моделей. На основании этого рекомендации, сделанные в работе, можно считать достоверными, а выводы обоснованными.

Диссертационная работа соответствует пунктам 1 «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых» и 9 «Экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов,

испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях» паспорта специальности 01.02.04 Механика деформируемого твердого тела.

Автореферат диссертации полностью соответствует содержанию работы и отражает актуальность исследования, цели, задачи, научную новизну, практическую значимость, достоверность полученных результатов и выводов.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов подтверждается аprobацией основных результатов работы на научных конференциях разных уровней, а также публикациями в международных и российских научных изданиях, в том числе 8 работ в журналах, рекомендованных ВАК и (или) в международные базы данных, такие как Scopus, Web of Science и т.д.

**Замечания по диссертационной работе:**

1. Автору следовало бы привести в работе блок-схемы методики проведения экспериментов, методики определения вязкоупругих параметров материала и процедуры идентификации параметров моделей.
2. Главу 4 следовало бы сократить путем исключения из нее традиционных подходов в вопросах идентификации, в частности, при анализе адекватности моделей (параграф 4.3).
3. В работе можно было привести решение задачи анализа НДС конструкции (например, прочноскрепленный заряд РДТТ, нагруженный внутренним давлением по гармоническому закону) для того, чтобы понять, что дает нелинейный подход описания вязкоупругих характеристик топлива по сравнению с линейным.
4. Во второй главе работы приведено моделирование экспериментальной задачи в конечно-элементном пакете ANSYS с целью определения «реальных» значений вязкоупругих параметров. При этом постановка задачи моделирования методом конечных элементов описана очень сжато, например, не ясно, учитывалась ли вязкоупругость материала при решении или была принята модель упругого поведения материала.
5. На стр. 37 работы говорится, что с помощью сосуда Дьюара с жидким азотом можно создавать давление, необходимое экспериментатору. На самом деле для этого применяются сосуды другой конструкции.

В целом, отмеченные недостатки не носят принципиальный характер, не снижают значимость полученных результатов и относятся, в большей степени, к оформлению работы и пожеланиям на будущие исследования. Диссертационная работа Янкина А.С. обладает логически выстроенной внутренней структурой и единством экспериментально-теоретического подхода, содержит новые научные результаты и рекомендации.

От лица ведущей организации Акционерное общество «Научно-исследовательский институт полимерных материалов» считаю, что диссертация

Янкина Андрея Сергеевича «Деформационные свойства высоконаполненных вязкоупругих полимеров при двухчастотных законах нагружения» является научно-квалификационной работой, в которой приведены результаты экспериментально-теоретического исследования по актуальной проблеме изучения физико-механических свойств наполненных полимерных композитов при сложных, близких к эксплуатационным, динамических нагрузках, имеет существенное значение для развития отрасли твердотопливного двигателестроения, что соответствует пункту 9 Положения о присуждении ученых степеней, а ее автор, Янкин Андрей Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Отзыв был обсужден на заседании отдела прочности, протокол № 026-06/7, от 08.11.2017 г.

Начальник отдела прочности  
Акционерного общества  
«Научно-исследовательский  
институт полимерных материалов»,  
кандидат технических наук.

Кочнева

Кочнева Н.М.

Диссертационная работа и отзыв на нее рассмотрены и одобрены научно-техническим советом АО «НИИПМ», протокол № 022-09/28 от 09.11.2017 г.

Подпись Кочневой Н.М. заверяю.

Ученый секретарь  
Акционерного общества  
«Научно-исследовательский  
институт полимерных материалов»,  
кандидат технических наук



Поносов

Поносова Л.М.

614113, г. Пермь, ул. Чистопольская, д. 16  
+7 (342) 254-10-53, e-mail: [niiipm@perm.ru](mailto:niiipm@perm.ru), [niiipm@list.ru](mailto:niiipm@list.ru)

Кочнева Наталья Михайловна кандидат технических наук (кандидатская диссертация по специальности 05.07.05 Тепловые, электроракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов). Адрес: 614023, г. Пермь, ул. Оханская, д. 31, кв. 98, тел.: +7 982 450 61 87