

# ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Семёнова Артёма Семёновича  
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 диссертации.** Разработкой математических моделей вязкоупругого поведения материалов и идентификацией их параметров занимались многие исследователи. В зависимости от вида воздействия и типа материала могут быть использованы самые разные подходы. Задача значительно усложняется теоретически и экспериментально в случае возникновения нелинейности, когда функции ползучести и релаксации зависят от приложенных напряжений и деформаций. В случае стационарных гармонических колебаний, рассматриваемых в работе автора диссертации, достаточно часто для описания поведения материала используется метод динамического механического анализа, который связан с использованием комплексных модулей. Однако в случае нелинейности использование комплексных модулей затруднено, так как при воздействии на материал одной гармоникой на выходе наблюдается некоторый спектр гармоник. При возникновении более сложных гармонических нагрузок, которые наблюдаются при эксплуатации вязкоупругих систем, например, двухчастотные вибрации при работе двигателя на твердом топливе, наблюдаемые нелинейные эффекты становятся более весомыми. Таким образом, актуальным является вопрос обоснования и выбора моделей в зависимости от материала и вида воздействия, их совершенствование, а также разработка новых более простых моделей (например, с меньшим объемом экспериментальных исследований, более простой параметрической идентификацией и т.д.) и процедур идентификации этих моделей. В связи с этим считаю выбор темы исследования обоснованным и актуальным.

**Практическая значимость** работы заключается в разработке инженерного аппарата по описанию деформационных свойств вязкоупругих высоконаполненных полимеров с целью предоставления данных научно-исследовательским институтам и конструкторским отделам отраслевых предприятий для расчета твердотопливных конструкций.

**Достоверность результатов** подтверждается соответствием результатов расчетов с данными экспериментальных исследований, грамотным использованием экспериментального и измерительного оборудования, корректным использованием принципов и подходов теории вязкоупругости. Таким образом, выводы и рекомендации, сделанные в диссертационной работе, считаю обоснованными и подтвержденными экспериментально, а также не противоречащими данными опытов и заключениям других авторов.

**Апробация.** Результаты, приведенные в работе, достаточно полно отражены в публикациях автора диссертации и доложены на научных семинарах, всероссийских и международных конференциях. Количество публикаций в журналах, рекомендованных ВАК и/или индексируемых в международных базах данных (Scopus, Web of Science и др.), достаточное (8 публикаций). При этом личный вклад автора в рассматриваемую проблему подтверждается публикациями в моноавторстве.

**Новизна** диссертационной работы заключается в получении новых экспериментальных данных о закономерностях деформирования высоконаполненного полимера; в разработке, на основе полученных данных, систем уравнений для описания вязкоупругого поведения твердых топлив, используемых при проектировании двигателей ракет, в зависимости от вида гармонического воздействия на них, которое может быть вызвано перевозкой ракет разными видами транспорта, работой самого двигателя и т. д.; в создании программы идентификации разработанных уравнений, которая включает методики проведения экспериментов и определения вязкоупругих параметров высоконаполненных полимеров, экспериментальный план и проведение опытов в соответствии с ним, процедуру параметрической идентификации по экспериментальным данным, а также оценку адекватности уравнений.

Разработанные автором уравнения, в отличие от более простого подхода (когда возможен принцип суперпозиции), позволяют учесть нелинейные эффекты при двухчастотных нагружениях, связанные с возникновением дополнительных гармоник (искажение формы петли гистерезиса), тем самым увеличивая точность описания поведения материала, что подтверждается экспериментами, выводами и рекомендациями, изложенными в работе. Также представленные уравнения позволяют отказаться от сложной процедуры определения ядер

релаксации и идентификации их параметров по результатам динамических испытаний, используя в качестве альтернативы полиномиальные функции (идентификация полиномов более проста и достаточно хорошо развита). Помимо этого, предложенные подходы не требуют проведения множества разносторонних экспериментов, что также является достоинством работы.

**Структура и содержание работы.** Диссертационная работа 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. В работе нет заимствованных материалов без ссылок на оригинальные источники.

**Автореферат** соответствует структуре и содержанию диссертационной работы и отражает результаты, основные выводы и рекомендации, приведенные в ней.

#### **Замечания по тексту диссертационной работы:**

1. При формулировке определяющих уравнений вязкоупругого материала (см., например, уравнения (2.1)-(2.3), (2.23), (2.25) и др.) автор ограничился рассмотрением одномерного случая. В работе отсутствуют рекомендации о том, как введенные уравнения могут быть обобщены на многоосный случай и записаны в тензорном виде. Важность подобных обобщений продиктована необходимостью определения сложного напряженного состояния при решении актуальных для практики краевых задач.

2. В работе отсутствует систематический анализ значений коэффициента Пуассона, который, скорее всего, также будет комплексной величиной. Автор отмечает, что в первом приближении коэффициент Пуассона можно принять равным 0,495, что соответствует слабосжимаемому материалу. Однако для подтверждения справедливости данного утверждения в рамках диссертационной работы следовало бы также провести аналогичные эксперименты по определению коэффициента Пуассона во всем диапазоне исследуемых частот и температур.

3. В рамках исследования был разработан экспериментальный план, использование которого обосновывается экономией средств и времени. Допустимость использования данного плана подтверждается сравнением модельных данных с дополнительными экспериментами в параграфе 4.3. Однако ничего не сказано о целесообразности использования такого плана эксперимента, не проведено его сравнение с другими планами, которые не отличались бы по количеству экспериментов и не приводили к увеличению трудозатрат.

4. Не понятно насколько общими являются сделанные выводы. Возможно ли использование разработанных уравнений и подходов на других материалах?

5. В работе не проверяется предположение о независимости вязкоупругих параметров от амплитуды деформирования.

6. Отсутствует описание граничных условий и метода определения эффективных свойств вязкоупругого материала при конечно-элементном решении задачи гомогенизации для образца в разделе 2.3.

7. На рисунках 4.3-4.8 отсутствует расшифровка символов на графиках в виде синих точек.

Указанные замечания не являются принципиальными, не влияют на положительную оценку диссертации в целом и не снижают ее научную и практическую значимость. Проблема, решаемая в работе, актуальна. Полученные результаты приведены в публикациях автора и являются новыми, сделанные выводы достоверны. Автореферат отражает суть диссертации. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой изложены методики и подходы описания поведения высоконаполненных полимеров, а также результаты исследования законов деформирования подобных материалов при одно- и двухчастотных нагрузках с целью предоставления информации инженерам конструкторских отделов предприятий для расчетов конструкций, что в свою очередь имеет существенное значение для развития отрасли ракетного двигателестроения страны.

Диссертационная работа «Деформационные свойства высоконаполненных вязкоупругих полимеров при двухчастотных законах нагружения» удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата технических наук, и соответствует всем критериям, изложенным в положении о присуждении ученых степеней (II, п.9-14). Автор диссертации, Янкин Андрей Сергеевич, обладает достаточной квалификацией для присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела.

Официальный оппонент  
Семёнов Артём Семёнович,  
доцент кафедры «Механика и процессы управления»  
Института прикладной математики и механики  
Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
политехнический университет Петра Великого»  
кандидат физико-математических наук

А.С. Семёнов

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,  
e-mail: [semenov.artem@gmail.com](mailto:semenov.artem@gmail.com), тел.: +7-(905)-2721188

Дата: 04.12.2017

