

ОТЗЫВ

официального оппонента Роменского Евгения Игоревича на диссертацию **Воронина Михаила Сергеевича** «Моделирование вязко-упругого поведения полимеров в рамках подхода Максвелла-Годунова», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела.

Область исследований, представленных в диссертации, относится к разработке моделей динамического деформирования вязко-упругих сред. Применение новых конструкционных материалов, особенно в условиях высокоскоростных и высокоэнергетических воздействий, требует создания новых моделей, адекватно описывающих поведение среды в широком диапазоне изменения скоростей деформаций, температур и давлений. При этом важно, чтобы разрабатываемые модели могли быть эффективно использованы для численного решения практических задач на современных компьютерах, а полученные решения являлись достоверными. Исследования, развиваемые в диссертационной работе, базируются на нелинейной гиперболической, термодинамически согласованной модели сплошной среды с релаксацией касательных напряжений, сформулированной в 70-е годы прошлого века под руководством С.К. Годунова. Свойства этой модели, а именно, гиперболичность и согласованность с законами неравновесной термодинамики как раз и обеспечивают возможность применения высокоэффективных численных методов и обеспечивают достоверность получаемых решений. В последние годы упомянутая модель в силу своей универсальности и эффективности привлекает интерес многочисленных исследователей, в основном специалистов в области численного моделирования, в разных странах. В рассматриваемой диссертации рассматривается обобщение и применение релаксационной модели для описания деформирования полимеров, которые в силу своей молекулярной структуры отличаются сложным реологическим поведением. Нелинейная релаксационная модель Максвелла для описания деформирования полимеров до настоящего времени не применялась, поэтому актуальность исследований не вызывает сомнений.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав и заключения. Полный объём диссертации составляет 145 страниц, включая 108 рисунков и 27 таблиц. Список литературы содержит 154 наименования.

Во **введении** описана актуальность темы исследования, приведен обзор развития модели вязко-упругого тела максвелловского типа. Сформулирована также цель диссертационной работы, состоящая в построении определяющих соотношений модели вязко-упругого тела максвелловского типа и последующем их применении к описанию деформирования конкретных полимеров; сформулированы научная новизна и практическая значимость работы, приведено краткое содержание работы по главам. Приведены данные об апробации работы,

отмечен личный вклад автора. В **первой главе** приводятся основные особенности строения и механического поведения полимеров. Сделан дополнительный обзор имеющихся подходов к моделированию деформирования полимеров. Приводится формулировка релаксационной модели максвелловского типа для вязкоупругого тела. **Вторая глава** посвящена построению уравнения состояния полимерных сред, которое бы соответствовало набору требований, перечисленных во введении. Также приводится обзор используемых ранее и современных уравнений состояния. **Третья глава** посвящена построению зависимостей функции времени релаксации касательных напряжений в случае полимеров и методам определения параметров этих зависимостей. Сформулирован упрощённый метод определения параметров времени релаксации, характеризующих предел упругости материала. В **четвертой главе** содержатся результаты расчётов типовых одномерных задач ударно-волнового деформирования полимеров, с помощью которых подтверждена адекватность построенной модели. И, наконец, в **заключении** сформулированы основные выводы по результатам выполненного диссертационного исследования.

Результаты исследований, изложенные в диссертации, получены на основе теории термодинамически согласованных моделей механики деформируемых сред, использования численных методов решения дифференциальных уравнений. Их достоверность обеспечивается непротиворечивостью построенных моделей, сравнением результатов с имеющимися экспериментальными данными.

Результаты диссертации являются новыми и практически значимыми и включают в себя:

1. Разработку нового подхода к моделированию вязко-упругого поведения для описания деформирования полимеров в широком диапазоне параметров состояния.

2. Уточнение уравнения состояния по сравнению с использовавшимися ранее уравнениями состояния металлов, построенного в компактной форме, что является преимуществом в численных расчётах, интенсивно использующих уравнение состояния;

3. Применение принципа суммирования релаксационных процессов для построения замыкающих соотношений неупругих деформаций.

4. Разработку нового, упрощённого метода определения параметров функции релаксации касательных напряжений, основанного на методе решения задачи о деформировании тонкого стержня.

Построенные в работе замыкающие соотношения (уравнения состояния и функции релаксации) могут быть использованы для численного моделирования практических задач динамического деформирования полимеров. Предложенную в диссертации модель вязко-упругого тела максвелловского типа для полимеров можно внедрить в коммерческие пакеты, например ANSYS Autodyn.

По материалам диссертации имеются следующие вопросы и замечания:

1. На стр. 35 высказано не совсем корректное утверждение о том, что требование положительности производства энтропии является необходимым условием гиперболичности. Следовало бы сказать, что условия возрастания энтропии совпадают с некоторыми из условий гиперболичности.

2. На стр. 35 выписана одномерная система уравнений, но нет комментариев (и расшифровки обозначений) относительно того, что эти уравнения предназначены как для плоского, так и для цилиндрического, а также сферического случаев.

3. Разработанная в диссертации модель базируется на включении скорости деформации в число параметров состояния. В частности, от скорости деформации зависят коэффициенты замыкающих соотношений, а именно модули упругости и функции релаксации напряжений. Это, безусловно, существенно облегчает согласование с имеющимися экспериментальными данными, но вызывает ряд вопросов:

3.1. Рассматриваемые задачи являются одномерными. Каким образом развиваемая модель обобщается на многомерный случай?

3.2. В работе скорость деформации учитывается на дискретном уровне. В то же время предложенная модель основана на релаксационной модели, дифференциальные уравнения которой являются гиперболическими. Если зависимость скорости деформации учитывать на континуальном уровне, то есть считать, что скорость деформации связана с производными скорости, то какому классу принадлежат соответствующие дифференциальные уравнения?

4. В диссертации имеются редакционные недостатки, в частности, немало пропущенных букв.

Указанные замечания не умаляют общей положительной оценки и высокого научного уровня работы.

Диссертационная работа Воронина Михаила Сергеевича «Моделирование вязко-упругого поведения полимеров в рамках подхода Максвелла-Годунова» является законченной научно-исследовательской работой. Основные результаты диссертационной работы изложены в 8 печатных работах в журналах, рекомендованных ВАК для опубликования научных результатов диссертации. Автореферат и опубликованные работы достаточно полно отражают содержание, основные положения и результаты диссертационной работы.

Диссертация полностью соответствует специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела и отвечает требованиям Министерства образования и науки РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842. Автор диссертации Воронин Михаил Сергеевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твердого тела

Я, Роменский Евгений Игоревич, согласен на включение моих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Воронина М.С.

Официальный оппонент, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник лаборатории Дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа ИМ СО РАН,

16 января 2018 г.



Е.И. Роменский

Подпись д.ф.-м.н., главного научного сотрудника лаборатории Дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа ИМ СО РАН Роменского Е.И. заверяю

Руководитель организационного отдела ИМ СО РАН  Н.З. Киндалева

Роменский Евгений Игоревич
доктор физико-математических наук,
специальность 05.13.16 – применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (по отраслям наук),
главный научный сотрудник лаборатории Дифференциальных уравнений и смежных вопросов анализа, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт математики им. С.Л. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук, г. Новосибирск, <http://www.math.nsc.ru>

Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Коптюга, д. 4,
Телефон: +7-383-3297657
Электронная почта: evrom@math.nsc.ru