

Отзыв официального оппонента  
на диссертацию **Витохина Евгения Юрьевича «Исследование  
колебательных и волновых процессов в термоупругой среде с учетом  
времени релаксации теплового потока»**,  
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.02.04 – Механика  
деформируемого твердого тела

Диссертация посвящена исследованию термоупругих волн и колебаний на основе модели гиперболической термоупругости, учитывающей конечное время распространения теплового импульса. Микро- и наноэлектромеханические устройства находят широкое применение во многих современных технологиях – электронике, машиностроении, метрологии, медицине. Использование традиционных методов механики сплошной среды для описания процессов в MEMS и NEMS зачастую некорректно, поскольку важную роль в этих устройствах играют высокоскоростные процессы, материалы приобретают новые свойства, проявляются эффекты разреженности, неравновесности (например, в насосах Кнудсена). В связи с этим развитие современных методов моделирования высокоскоростного теплового воздействия на материалы является **актуальной** задачей, имеющей большую практическую значимость.

**Основные результаты.** В первой главе диссертации записана система уравнений связанный задачи гиперболической термоупругости (модель Лорда-Шульмана). Особенность модели заключается в использовании обобщенного уравнения теплопроводности, содержащего зависимость от конечного времени релаксации теплового потока и учитывающего деформируемость среды. Система уравнений решена в одномерной постановке для случая лазерного воздействия на материал. Проведена верификация численного метода, изучены преимущества и недостатки использования явных и неявных схем, даны рекомендации по выбору схемы.

Оценены предельные значения интенсивности излучения, при которых применима линейная теория. Исследован характер распространения термоупругих волн, проведено сравнение решений, полученных в классической и гиперболической постановках. Показано, что для металлов по высоте пиков на профиле температуры можно судить о пределах применимости классической модели теплопроводности.

Во второй главе подробно исследовано влияние граничных условий на решение задачи термоупругости Лорда-Шульмана при импульсном лазерном воздействии. Наибольшие отличия решений, полученных на основе классической и гиперболической моделей, возникают в задаче с закрепленными границами и постоянной температурой на них, наименьшие – в задаче со свободными границами и теплоизоляцией. Проанализировано влияние связности постановки задачи на решение, показано, что для получения качественной картины достаточно использовать полусвязанную постановку задачи.

В третьей главе проведен асимптотический анализ дисперсионных соотношений в случае модели Лорда-Шульмана, выведены приближенные формулы для дисперсионных соотношений. Теоретически обоснована возможность экспериментального определения времени релаксации теплового потока с использованием волнового числа отсечки.

Перечисленные выше результаты являются **новыми**. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, не вызывает сомнений. **Достоверность** полученных результатов обоснована применением проверенных теоретических методов механики деформируемого твердого тела и асимптотического анализа, верификацией программной реализации численного метода на основе сравнения с аналитическим решением для тестовой задачи, подробным анализом сходимости использованных численных схем.

По содержанию диссертации можно сделать следующие **замечания**:

1. При описании быстропротекающих процессов важную роль играет отношение времени релаксации  $\tau$  и характерных времен явления (период колебаний, время изменения макропараметров  $\vartheta$ ). В соответствии с соотношениями характерных времен оценивается степень отклонения от равновесия, которая, в основном, и определяет требуемый уровень детальности модели. Чем дальше система от равновесия – тем более подробным должно быть описание. В связи с этим было бы интересно провести анализ влияния соотношения  $\tau/\vartheta$  на решение и определить безразмерный критерий, позволяющий сделать выбор модели (классическая/гиперболическая) на раннем этапе решения задачи. Некоторые шаги в этом направлении в работе уже сделаны, но нет анализа и обобщения.

2. Есть путаница в определении удельной теплоемкости. В формулах используется теплоемкость при постоянном объеме, а при задании исходных условий – теплоемкость при постоянном давлении, при этом размерность  $c_p$  вызывает сомнения, видимо, должно быть Дж/(кг\*К), а не Дж/К.

3. Замечания редакционного характера:

Исследование проводится на основе модели Лорда-Шульмана, при этом в тексте нет явной формулировки модели. Уравнения выписаны, но нигде не указано, что именно они описывают модель Лорда-Шульмана. Есть недочеты в ссылках на формулы и литературу. В частности, из 82 ссылок на литературу как минимум 5 повторяются. Некоторые рисунки в тексте не описаны и даже не упомянуты; подписи к рис. 1.18-1.20 не соответствуют содержанию. Кроме того, результаты довольно сложно анализировать, т.к. во многих рисунках нет содержательной легенды. Некоторые важные величины (как, например, величина  $\tau_0$ ) не определены. В тексте есть повторы (например, трижды определяется погрешность и норма функции), а также ряд опечаток.

Указанные замечания не снижают научной ценности работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой,

вносящей вклад в развитие теории гиперболической термоупругости, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес. Работа обладает внутренним единством и выполнена на высоком теоретическом уровне. Диссертация имеет продуманную структуру, хорошо оформлена, краткие заключения по главам облегчают восприятие материала.

Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

На основании сказанного считаю, что диссертация «Исследование колебательных и волновых процессов в термоупругой среде с учетом времени релаксации теплового потока» полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г.

№ 842. Автор диссертации, Витохин Евгений Юрьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

Официальный оппонент,  
Кустова Елена Владимировна  
доктор физико-математических наук,  
доцент, профессор кафедры гидроаэромеханики  
математико-механического факультета  
Санкт-Петербургского государственного университета  
198504, Санкт-Петербург  
Университетский пр., д. 28  
(812) 428 49 11  
[e.kustova@spbu.ru](mailto:e.kustova@spbu.ru)

Е.В. Кустова

21.12.2017

ЛИЧНУЮ ПОЛПИСЬ ЗАМЕНИТЬ

НАЧАЛЬНИК ОТДЕЛА

Н. И. МАШТЕДА



Документ подготовлен  
в порядке исполнения  
трудовых обязанностей