

ОТЗЫВ

председателя диссертационного совета на диссертацию Матяса Дмитрия Васильевича на тему: «Использование пространственного описания в задачах гиперболической термоупругости и динамики деформируемого твердого тела», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.

В диссертации исследуются вопросы применимости и основные преимущества пространственного (эйлерова) подхода при описании термоупругих волн и решении задач механики деформируемого твердого тела. В рамках единого подхода рассмотрены три различные проблемы: задача о гиперболической термоупругости в твердом теле и в газе, задача о раскрытии трещины и задача о распространении волн в среде с вращательными степенями свободы. Каждая из задач представляет **актуальное** направление современной механики. Исследование высокоскоростного теплового воздействия на материалы важно в микроэлектронике, метрологии, медицине; при этом применение модели гиперболической термоупругости открывает новые возможности для описания процессов, протекающих на микро- и наномасштабных уровнях. Моделирование раскрытия трещины – одно из ключевых направлений при изучении гидроразрыва пласта; создание эффективных методов численного моделирования, позволяющих укрупнять сетку в некоторых направлениях, а также учитывать взаимодействие между жидкой средой и твердым телом, несомненно, является актуальным и имеет практическое приложение. Описание взаимодействия волн на границе раздела сред с вращательными степенями свободы важно при моделировании геодинамических и сейсмических процессов. Разработка единого подхода, основанного на интегральной записи уравнений баланса массы, импульса и энергии в разных средах, позволит использовать метод конечных объемов для численного моделирования широкого круга проблем механики и повысить эффективность вычислительных методик.

Основные результаты. В первой главе диссертации записана система уравнений связанной задачи гиперболической термоупругости применительно к твердому телу и к газам. Особенность модели заключается в использовании обобщенного уравнения теплопроводности, содержащего зависимость от конечного времени релаксации теплового потока и учитывающего деформируемость среды. Получены системы уравнений в интегральной форме. Преимущество данной формы состоит в том, что она позволяет использовать метода конечных объемов вместо метода конечных разностей, что во многих задачах является более эффективным. Система уравнений решена в одномерной постановке для случая кратковременного лазерного воздействия на материал. Для газа задача в такой постановке решается впервые. Проведена тщательная верификация численного метода, сравнение решений, полученных методами конечных разностей и конечных объемов, исследована сеточная сходимость, изучены преимущества и недостатки использования явных и неявных схем. Проведен сравнительный анализ распространения термоупругих волн в твердом теле и газе, показано, что в газе величины амплитуд квазиакустической и квазитепловой волн имеют один порядок. Установлен масштаб, на котором необходимо рассматривать распространение теплового возмущения с конечной скоростью. Оценено влияние связанности процессов массо- и теплопереноса на распространение тепловых и акустических волн в зависимости от величины времени

релаксации теплового потока. Исследовано влияние различных граничных условий на профили термоупругих волн в газе.

Во второй главе решается задача о раскрытии трещины, также в рамках пространственного подхода. Запись уравнений в интегральной форме дает возможность, используя метод конечных объемов, вводить более грубую сетку в направлении, параллельном трещине. Это заметно повышает эффективность численного алгоритма. Более того, построенный алгоритм пригоден как для динамических расчетов быстротекущих процессов, так и для отыскания квазистатического решения. Разработана программа, которая позволяет получить профиль раскрытия трещины как с учетом действия гравитации и наличия начального бокового и вертикального сжимающих напряжений, так и без рассмотрения силы тяжести. Обнаружена нелинейная зависимость величины раскрытия трещины от нагрузки; при использовании стандартных численных методик такая зависимость не наблюдалась.

В третьей главе в рамках эйлера подхода изучается прохождение волны через границу раздела сред с разными жесткостями в континууме Коссера в двухмерной постановке. Исследуется поведение плоской волны вращения, в качестве падающей волны рассматриваются крутильные и изгибные волны. Получено численное решение для различных соотношений жесткости сред, через границу раздела которых проходит волна. Установлена зависимость поведения отраженных и преломленных волн вращения от угла падения и соотношения крутильных и изгибных жесткостей рассматриваемых сред.

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. **Практическая значимость** результатов состоит в создании эффективных численных алгоритмов, основанных на интегральной записи уравнений и методе конечных объемов; область применимости данных алгоритмов охватывает широкий круг инженерных приложений.

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

1. Постановка задачи о гиперболической термоупругости в газе мне представляется не достаточно самосогласованной. Принимается, что газ теплопроводный, но при этом в нем отсутствуют касательные напряжения. В гидромеханике обычно рассматривается либо идеальный газ (невязкий и нетеплопроводный), либо вязкий и теплопроводный. Это подтверждается и выводом уравнений гидромеханики из уравнения Больцмана: вязкость и теплопроводность появляются в уравнениях, соответствующих функции распределения первого приближения, то есть это эффекты одного порядка. Таким образом, неясно, почему в работе пренебрегается молекулярной вязкостью; данное предположение в тексте даже не обсуждается. Более того, сам термин «термоупругость» в данной постановке звучит немного странно.

2. В газах с внутренними степенями свободы (в частности, в рассматриваемом в работе воздухе) важную роль в распространении возмущений играют релаксационные процессы – обмены поступательной и внутренней энергией на молекулярном уровне. Характерные времена этих процессов сравнимы со временем релаксации теплового потока, поэтому уравнения, записанные в диссертации, следует решать совместно с уравнениями релаксации внутренних степеней свободы или вводить объемную вязкость в нормальные напряжения. В работе отсутствуют комментарии на эту тему. Стоило бы провести анализ того, как влияет молекулярная вязкость и объемная вязкость на распространение термоупругих волн в газе.
3. Автор пользуется безразмерными величинами при решении задачи, но при этом не вводит каких-либо безразмерных критериев, имеющих четкий физический смысл. Например, величину d в уравнении (45) при учете вязкости можно было бы выразить через число Прандтля, безразмерную скорость газа стоило бы определять через скорость звука, которая является ключевым параметром при описании распространения возмущений в газе. Странно, что скорость звука не появляется в уравнениях (47), это было бы полезно и наглядно.
4. На рис. 29 приводится очень интересный новый результат – нелинейная зависимость величины раскрытия трещины от нагрузки. Но в тексте не обсуждается наличие экспериментального подтверждения данного факта. Стоило бы дать комментарий: есть ли такие данные, какой эксперимент можно провести, чтобы подтвердить данный эффект.
5. Есть небольшие недочеты редакционного характера: на стр. 29-30 не указана длительность лазерного воздействия δ_0 (или импульс мгновенный?); на рис. 14 не указаны времена, при которых получены соответствующие кривые; уравнение (6) содержит опечатки (знак, ρ вместо ρ_0); параметры (67)-(68) выбраны неудачно, нужно вводить безразмерные критерии. Есть недочеты в терминологии: уравнение (4) – это не «уравнение теплопроводности», а уравнение баланса энергии; не совсем понятно, как определяются «термоупругие» волны в газе.
6. Во введении не раскрыт личный вклад автора в совместных публикациях.

Указанные замечания не снижают научной ценности работы в целом. Диссертация является законченной научно-квалификационной работой, вносящей вклад в развитие теории гиперболической термоупругости и динамики деформируемого твердого тела, содержит новые результаты, представляющие научный и практический интерес. Работа выполнена на высоком теоретическом уровне, имеет продуманную структуру, хорошо оформлена. Краткие заключения по главам облегчают восприятие материала.

Основные результаты, выносимые на защиту, опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК. Работа прошла апробацию на международных конференциях и семинарах ведущих научных центров.

Диссертация Матяса Дмитрия Васильевича на тему: «Использование пространственного описания в задачах гиперболической термоупругости и динамики деформируемого твердого тела» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Матяс Дмитрий Васильевич заслуживает

присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по научной специальности 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела. Пункт 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Председатель диссертационного совета,
доктор физико-математических наук, профессор,
профессор кафедры гидроаэромеханики СПбГУ



Кустова Е.В.

Дата

29.03.2021

Можно подписать Кустовой Е.В.
удостоверено

ЗАМЕСТИТЕЛЬ НАЧАЛЬНИКА
УПРАВЛЕНИЯ КАДРОВ
ГУОРП
ОС СУВОРОВА

