

## ОТЗЫВ

официального оппонента Потянихина Дмитрия Андреевича на диссертационную работу Штуки Виктора Игоревича «Лучевой метод в исследованиях одномерных цилиндрических ударных волн в несжимаемой упругой и упруговязкопластической средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»

**Актуальность темы диссертации.** Несмотря на неугасающий интерес ученых-механиков к динамическим задачам деформирования твердых тел, в данной области остается большое количество нерешенных проблем. Пожалуй, самым существенным отличием динамики деформирования от смежных областей знания является сложность постановки экспериментов. Волновые процессы распространяются со скоростями порядка нескольких километров в секунду. Заглянуть внутрь материала без нарушения его сплошности невозможно. Судить о характере происходящих динамических процессов приходится в результате косвенных измерений на поверхности исследуемого образца. В этом случае математическое моделирование является мощным и полезным методом исследования.

Краевые задачи о распространении плоских волн исследованы теоретически достаточно подробно, тем более в предположении о чисто упругом поведении среды. Кроме того, большая часть работ содержит исследование процессов распространения объемных деформаций. В представленной диссертации за счет выбора соответствующих математических моделей внимание сосредоточено на деформациях изменения формы, притом в криволинейной цилиндрической системе координат. Такие решения в литературе представлены в меньшей степени. Однако для понимания особенностей деформирования, например, резиноподобных несжимаемых материалов, они нужны. Тем самым определяется актуальность представленной диссертации.

**Оценка новизны.** Научная новизна обеспечивается следующим.

1. На основе анализа условий совместности разрывов показано, что известные результаты для плоских одномерных ударных волн о существовании плоскополяризованных волн нагрузки и круговой

поляризации могут быть обобщены на случай одномерных цилиндрических ударных волн.

2. Впервые вычислены скорости движения цилиндрических одномерных ударных волн в несжимаемой среде в зависимости от предварительных деформаций и интенсивностей разрывов. Указаны закономерности затухания таких разрывов.

3. Метод лучевых разложений для построения приближенных решений обобщен на случай цилиндрических ударных волн нагрузки и круговой поляризации.

4. Предложен и реализован алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния в несжимаемом цилиндрическом слое (упругом и упруговязкопластическом) при распространении в нем цилиндрических ударных волн с выделением на каждом временном шаге положений поверхностей разрывов и их интенсивностей. Указаны особенности построения алгоритма при неизотермичности деформирования.

5. Впервые получены приближенные аналитические и численные решения динамических одномерных задач об ударном нагружении несжимаемого цилиндрического слоя в моделях упругой и упруговязкопластической сред.

Можно отметить, что новые результаты получены одновременно в трех областях исследований, сформулированных в паспорте специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела»:

- в области «Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых»;
- в области «Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники»;
- в области «Математические модели и численные методы анализа применительно к задачам, не допускающим прямого аналитического исследования».

**Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, их достоверность.** В диссертационной работе автором

проведен подробный анализ известных достижений и теоретических положений отечественных и зарубежных авторов. Все утверждения подтверждены ссылками на источники. Для подтверждения результатов и выводов данного исследования диссертант приводит решения задач, проводит их сравнение и сопоставление с работами других авторов.

Основные результаты диссертации, опубликованные в 15 научных работах, обсуждались на международных конференциях и семинарах. В частности, диссертант выступал на семинаре Института машиноведения и металлургии Дальневосточного отделения Российской академии наук.

Достоверность полученных результатов определяется использованием известных и проработанных методов и моделей механики динамического деформирования твердых тел, в том числе теории особых движущихся поверхностей разрывов и метода лучевых разложений. Аккуратное и последовательное применение аппарата математической физики и вычислительной математики позволяет сделать вывод о высокой степени достоверности диссертационного исследования.

**Теоретическая и практическая значимость.** Знание о возможных типах волн, их скоростях и порядке следования даже при постановке граничной задачи оказывается необходимым. Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования состоит в получении новых сведений о характере распространения граничных воздействий в неклассических средах в криволинейной системе координат.

Практическая значимость связана возможностью использования решений задач для разработки алгоритмов расчета высокоскоростных воздействий на цилиндрические материалы с усложненными свойствами.

**Структура работы и основные научные результаты.** Представленная диссертация изложена на 131 странице. По своей структуре диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 202 наименований; содержит 27 рисунков.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость. Приведен анализ литературных источников по теме работы.

В первой главе формулируются модельные соотношения динамики деформирования несжимаемого твердого тела. Приведен способ разделения полных деформаций на обратимую и необратимую составляющие на основе уравнений переноса. Выписаны условия совместности разрывов. Кратко описан лучевой метод решения краевых задач с ударными волнами.

Во второй главе проведен анализ условий совместности разрывов в цилиндрическом несжимаемом упругом слое, показана возможность существования ударной волны сдвига и ударной волны круговой поляризации. Рассмотрена краевая задача о распространении ударных волн в несжимаемом упругом материале с антиплоскими предварительными деформациями, расположенном между двумя жесткими коаксиальными цилиндрами, вследствие равноускоренного вращательного движения внутреннего цилиндра. Ее решение получено с использованием метода лучевых разложений.

В третьей главе рассматривается задача, в которой слой между двумя цилиндрическими поверхностями является упруговязкопластическим, предварительные деформации скручивающие, а ударное воздействие возникает вследствие аксиального движения внутреннего цилиндра.

В четвертой главе краевая задача об ударном деформировании несжимаемого слоя рассматривается с учетом температуры. Предварительные деформации носят смешанный характер. Граничные условия соответствуют винтовому движению внутреннего цилиндра при неподвижном внешнем, а также изменяющемуся во времени по степенному закону нагреву внутреннего цилиндра.

Заключение содержит краткий обзор основных результатов, полученных в диссертационном исследовании.

**Список вопросов и замечаний по диссертации и автореферату.** При рассмотрении представленных в диссертации и автореферате материалов возникли следующие замечания.

1. Вызывает недоумение неаккуратность в оформлении. Работа содержит значительное количество грамматических и пунктуационных ошибок, автор вольно трактует правила расстановки знаков препинания. Для формул (2.36), (2.37), (3.30), (3.31), (4.21), (4.22) диссертации и формул (21) и (22) автореферата использован шрифт, отличный от основного. Размер

шрифта в формулах величина по непонятным причинам переменная. В формуле (1.29) диссертации для обозначения одной и той же компоненты вектора скорости используется и прямое написание буквы  $v$ , и курсив. Это несколько не влияет на оценку научных результатов, однако снижает общее впечатление.

2. Решение представленных задач является численным, однако описанию алгоритма уделено крайне мало внимания.

3. На стр. 88 диссертации автор утверждает, что при сравнении поведения упругой и упруговязкопластической сред очевидно влияние вязкопластичности и ссылается на источник [126] (Седов Л.И., Введение в механику сплошной среды, 1962). Однако в данном источнике отсутствует описание поведения упруговязкопластических сред.

4. Невозможным оказывается оценить влияние различных эффектов (вязкости, пластичности, температуры) на характер деформаций, потому что *при рассмотрении трех моделей твердого тела решаются разные граничные задачи*. В рамках упругой модели (глава 2) решается задача с граничными условиями, соответствующими равноускоренному вращательному движению внутреннего цилиндра с антиплоскими предварительными деформациями. В рамках упруговязкопластической среды (глава 3) рассматривается задача об аксиальном движении внутреннего цилиндра при скручивающих предварительных деформациях. В термоупругой модели (глава 4) предварительные деформации определяются аксиальными и вращательными смещениями, а граничные условия соответствуют винтовому движению внутреннего цилиндра. Автор пишет в главе 4 на стр. 92: «Результаты, полученные в данной главе естественным образом перекликаются с результатами второй главы, что определяет явную возможность для их сравнения». Однако в главе 2 приведены графики угла закручивания, эволюции интенсивности скручивающего воздействия и компоненты тензора напряжений  $\sigma_{\varphi z}$ , а в главе 4 – эволюции интенсивности температуры, компонент тензора деформаций  $\alpha_{r\varphi}$  и  $\alpha_{rz}$ , относительной температуры и добавочного гидростатического давления (ни одного совпадения). Провести в таких условиях сравнение проблематично. И автор такое сравнение тоже не проводит.

5. Присутствуют опечатки в формулах. На стр. 24 для обозначения полных деформаций используется  $d_{ij}$  вместо  $\alpha_{ij}$ . На стр. 24 и 27 опечатки в

индексах инвариантов тензора полных деформаций. На стр. 28-29 написаны лишние слова выражения  $e_{ij}$  и  $p_{ij}$ .

6. На стр. 67 упоминаются эффект Баушингера и гистерезис на диаграмме растяжения-сжатия. Нигде в работе эти эффекты не используются, поэтому их упоминание считаю излишним. В начале первого абзаца на стр. 35 первое предложение не связано ни с предыдущим, ни с последующим текстом. Его можно было написать во введении, но в основной части оно выглядит неуместным.

7. В §1.1 приведены три условия пластичности. Однако ни здесь, ни в главе 3 не объясняется, почему диссертант выбрал именно условие Мизеса.

8. Словесное описание краевых задач в нескольких местах некорректно. На стр. 51 написано «... начинает совершать *равномерное и равноускоренное* вращательное движение...». На стр. 75 указано «... цилиндр мгновенно начинает совершать *равноускоренное* вращательное движение...», хотя заданные граничные условия соответствуют аксиальному движению.

9. Ряд строго определенных научных терминов трактуется автором по-своему. На стр. 6 утверждается, что на слабых волнах разрыв испытывают скорости. На стр. 9 гравитационные явления называются субстанцией. На стр. 20 лагранжева и эйлерова системы координат названы совмещенными.

10. В §1.1 постулируется, что  $\det(a_{ij}) > 0$ . А почему он не может быть отрицательным?

11. Выводы в автореферате и диссертации (в заключении) не совпадают.

### **Заключение**

Несмотря на отмеченные недостатки и замечания, представленная диссертация Штуки Виктора Игоревича «Лучевой метод в исследованиях одномерных цилиндрических ударных волн в несжимаемой упругой и упруговязкопластической средах» выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-квалификационную работу.

Автореферат и публикации автора, пять из которых представлены в ведущих рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, полностью отражают и соответствуют основному содержанию диссертации. Диссертация соответствует паспорту специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

На основании вышеизложенного считаю, что диссертационная работа «Лучевой метод в исследованиях одномерных цилиндрических ударных волн в несжимаемой упругой и упруговязкопластической средах» удовлетворяет критериям Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 N 842 (ред. от 28.08.2017) «О порядке присуждения ученых степеней», в том числе и п.9, поскольку в ней получены новые решения краевых задач, расширяющие научные представления о закономерностях распространения волн в средах с нелинейными определяющими соотношениями.

Считаю, что Штука Виктор Игоревич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.04 – «Механика деформируемого твердого тела».

Официальный оппонент – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории химических и фазовых превращений в материалах ФГБУН «Институт машиноведения и металлургии» Дальневосточного отделения Российской академии наук

  
Д.А. Потянихин

Адрес организации: 681005, Россия, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, ул. Металлургов, д.1.  
Телефон: +7(4217) 54-95-39  
e-mail: mail@imim.ru

Подпись Потянихина Дмитрия Андреевича заверяю

Врио директора ИМиМ ДВО РАН

  
О.Н. Комаров

23.01.2