

УТВЕРЖДАЮ

И.о. декана

Математико-механического факультета
Елена Владимировна Кустова

(подпись)

(инициалы, фамилия)

« 29 »

2024 г



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет»

По итогам рассмотрения и обсуждения

Диссертации Волкова Григория Александровича,

представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
по теме «Инкубационные характеристики предельных состояний сплошных сред»

по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

и выполненной в Федеральном государственном бюджетном образовательном
учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный
университет», 2024

а также представленных соискателем научных публикаций, в которых излагаются основные научные результаты диссертации, приняты следующие решения, замечания и рекомендации:

В диссертации Волкова Григория Александровича исследуются эффекты, возникающие в нестационарных переходных процессах при высокоинтенсивных экстремальных воздействиях, характеризующиеся закономерностями, которые моделируются на основе структурно - временного подхода, базирующегося на понятии инкубационного времени. Исследуемые эффекты не имеют удовлетворительного объяснения на основе традиционных подходов, большинство из которых являются прямой экстраполяцией квазистатических представлений о наличии предельных характеристик в сплошных средах. Особое внимание уделено задачам, связанным с новым способом оценки значений ключевых параметров материала, так как именно возможность точной оценки позволяет находить новые закономерности в процессах разрушения сплошных сред при высокоскоростном ударном нагружении.

Актуальность темы обусловлена необходимостью разработки фундаментальных основ для новых стандартизированных методов тестирования материалов в условиях высокоскоростного нагружения, по результатам которых будет оцениваться набор значений определяющих параметров, позволяющих предсказывать критические условия возникновения разрушения для произвольного ударного динамического воздействия.

Ранее было показано, что в настоящее время структурно-временной подход является основой одного из немногих существующих аналитических способов решения задач прогнозирования предельных условий возникновения разрушения при высокоскоростном ударном нагружении. Однако, для успешного применения

№ 33-04-179 от 29.08.2024

соответствующих этому подходу критериев в научной и инженерной практике для конкретных сред необходимо иметь не только теоретическую основу, но также знать точные значения модельных параметров. В настоящей работе предлагается стандартизированная методика обработки экспериментальных данных, позволяющая проводить математически обоснованную оценку параметров с учётом специфики динамических ударных испытаний, для которых характерно обычно небольшое число измерений, а также наличие случайных помех с неизвестным распределением.

Работа содержит 204 страницы и состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

В первой главе изложены основные идеи применения критерия инкубационного времени для моделирования скоростной зависимости прочности, а также изложена методика оценки значения инкубационного времени, основанная на рандомизированном методе знаковозмущенных сумм. Приведен детальный разбор основной идеи метода, а также доказана теорема о выполнении условий применимости метода для исследуемой задачи и об ограниченности, получаемой в результате оценки. На примере экспериментальных данных для различных материалов показана эффективность предлагаемого метода.

Вторая глава посвящена исследованию влияния равновесных параметров состояния сплошной среды, а именно температуры и внешнего гидростатического давления, на значения модельных параметров прочности. Предложены температурные зависимости для инкубационного времени и критического напряжения, а также проведено обоснование предлагаемых моделей на примере задач, связанных с акустической и импульсной кавитацией жидкостей. Также показано, как разработанные методы могут быть использованы для корректирования условий фазового равновесия для сплошной среды, находящейся в области действия фонового акустического ультразвукового поля.

С целью обоснования практической значимости развиваемых методов, основанных на концепции инкубационного времени, в третьей главе представлены результаты исследования особенностей энергоёмкости процессов динамического разрушения. Показано наличие оптимальных режимов ударного разрушающего воздействия на сплошную среду при контактном взаимодействии. Рассматривается влияние сверхзвуковой фазы взаимодействия контактирующих поверхностей на значения оптимальных с точки зрения энергозатрат значений параметров задачи.

В четвертой главе приводится новый метод обработки данных динамических испытаний, позволяющий производить оценку оптимальных значений сразу двух модельных параметров прочности, а именно не только инкубационного времени, но и критического напряжения, определяющего устойчивость среды непосредственно к уровню напряжений нагружающего воздействия. Проверка и апробация предложенного метода на примере обработки данных динамических испытаний хрупких материалов. Показано, как с помощью нового метода может быть выявлена скоростная зависимость режима разрушения в хрупких двухкомпонентных средах.

Пятая глава посвящена поиску новой механической интерпретации основных параметров критерия инкубационного времени. Проводится сравнение развиваемых методов с моделями других авторов, также устанавливается взаимосвязь с параметрами других феноменологических подходов, предсказывающих критические условия разрушения сплошных сред при ударных высокоскоростных воздействиях.

Наиболее значимые научные результаты, полученные автором лично:

1. Установлена и проведена проверка модельной функции, описывающей скоростную зависимость прочности материалов с помощью критерия инкубационного времени, к условиям применимости рандомизированного метода знаковозмущенных сумм. Доказано, что результатом использования метода будет оценка значения инкубационного времени, представленная в виде ограниченного интервала, который содержит истинное значение параметра с заранее выбранным уровнем вероятности. На примере различных видов горных пород, бетонов, а также льда, проведена обработка данных высокоскоростных испытаний, демонстрирующая эффективность предложенного метода.
2. Разработана модификация способа обработки данных с помощью метода знаковозмущенных сумм для временной зависимости прочности. Проведены расчёты показывающие, показывающие эффективность метода на примере обработки данных испытаний, полученных при исследовании явления импульсной кавитации воды.
3. Разработана аналитическая модель, позволяющая предсказывать порог акустической ультразвуковой кавитации. Проведены расчёты, порога кавитации, моделирующие кривые Эша, которые обобщают результаты, полученные экспериментально различными авторами.
4. Предложен способ определения статического порога кавитации в зависимости от температуры и фонового давления жидкости. Проведены расчеты, позволяющие промоделировать зависимость порога ультразвуковой кавитации от температуры при различных значениях фонового давления.
5. Разработана модель, определяющая энергоёмкость процесса разрушения при высокоскоростном ударном нагружении. Выявлено наличие энергетически оптимальных режимов нагружения для различных форм контактирующих поверхностей.
6. Построена аналитическая модель, позволяющая учитывать влияние сверхзвуковой фазы контактного взаимодействия на величину параметров задачи, отвечающим энергетически оптимальным режимам разрушения.
7. Разработан способ оценки сразу двух модельных параметров: инкубационного времени и критического напряжения, путем обработки данных только динамических испытаний. На основе этого способа предложена аналитическая модель, позволяющая выявлять скоростную чувствительность режима разрушения в хрупких двухкомпонентных материалах.
8. Предложена новая механическая интерпретация параметров критерия инкубационного времени. Продемонстрировано, что значение инкубационного времени определяет переменный нормирующий коэффициент, имеющий размерность скорости деформации, который позволяет получать единую скоростную зависимость прочности в безразмерных координатах для всех сплошных сред. Показано, что критическое напряжение может не всегда совпадать со значением статической прочности материалов. Необходимость наличия безразмерного параметра может свидетельствовать наличии конкуренции различных микроструктурных процессов, определяющих макроразрушение сплошной среды.

Научная новизна работы

Построена модель возникновения фазовых превращений сплошных сред в результате действия неравновесной механической нагрузки. На примере фазового

перехода жидкости в газообразное состояние, впервые показано каким образом влияет акустическое неравновесное воздействие на условия фазового равновесия. Посчитаны «подправленные» кривые фазового равновесия «жидкость-пар» для воды, находящейся в зоне действия допороговой ультразвуковой волны.

Впервые разработан метод оценки значений инкубационного времени в виде доверительного интервала по данным динамических испытаний при высокоскоростном и ударно-импульсном нагружении.

Впервые исследована энергоёмкость процессов динамического разрушения при контактном взаимодействии жесткой частицы с упругим полупространством в зависимости от формы контактирующих поверхностей. Исследовано влияние наличия сверхзвуковой стадии взаимодействия на существование оптимальных режимов нагружения, предложен способ ее учета.

Разработана методика обработки данных высокоскоростных динамических испытаний, позволяющая провести оценку сразу двух параметров прочности инкубационного времени и критического напряжения.

Впервые был разработан аналитический подход, позволяющий выявить скоростную чувствительность режима разрушения в хрупких двухкомпонентных материалах, только по результатам сравнительного анализа скоростной зависимости прочности материала и данных статических испытаний, без каких-либо исследований структуры разрушенных образцов.

Разработан аналитический подход, позволяющий выявить скоростную чувствительность механизмов пластического деформирования в металлах. Работоспособность предлагаемого подхода проверена на примере сравнения результатов, получаемых для сплавов с крупнозернистой и ультрамелкозернистой структурой.

На основе разработанных методов дана новая интерпретация параметров критерия инкубационного времени.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая и практическая значимость проведенного исследования состоит в развитии методов, основанных на концепции инкубационного времени, в задачах по предсказанию критических условий возникновения переходных процессов при неравновесных воздействиях. Разработанная в рамках работы стандартизированная методика оценки значения инкубационного времени для конкретного материала по результатам обработки экспериментально наблюдаемой для него скоростной зависимости динамической прочности будет способствовать более широкому внедрению методов структурно-временного подхода в научную и инженерную практику. Также оценка инкубационного времени в виде доверительного интервала позволяет проводить более объективное сравнение прочностных свойств различных материалов.

Разработанные аналитические модели, позволяющие оценить энергоёмкость процессов динамического разрушения, помогли выявить оптимальные значения параметров задачи, соответствующие наиболее энергоэффективному разрушающему воздействию. Эти модели могут быть полезны при решении различных практических задач, для которых важно противодействовать процессу разрушения каких-либо конструктивных элементов, или наоборот производить разрушение материалов, требующих механической обработки.

Новый метод, позволяющий выявить скоростную чувствительность режимов разрушения двухкомпонентных хрупких материалов или процессов неупругого деформирования металлов, представляет собой не только большой научный интерес, но и также имеет большое практическое значение, например, при создании и разработке новых гетерогенных материалов, которые планируется применять в конструкциях,

подвергающихся во время эксплуатации высокоскоростным ударным воздействиям.

Степень достоверности результатов

Достоверность полученных результатов в области механики разрушения обусловлена использованием идей, лежащих в основе критерия инкубационного времени, который за последние 30 лет хорошо себя зарекомендовал при решении задач, связанных с прогнозированием критических характеристик переходных процессов, в совершенно разных областях механики и физики. Рандомизированный метод знаковозмущенных сумм, используемый в работе для оценки значений модельных параметров, также прошёл апробацию временем. За последние 10 лет был опубликован ряд работ, посвященных методу, в рейтинговых международных изданиях.

Апробация результатов

Результаты научных исследований Волкова Г.А. представлены на 20 конференциях и опубликованы в 19 работах по теме исследования, из которых 19 статей опубликованы в изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science (4 статьи опубликованы в журналах, входящих в Q1 согласно SJR). Научные исследования диссертанта выполнены при поддержке 5 грантов под личным руководством автора, из которых 1 грант РНФ (20-79-10078), 1 грант РФФИ (20-31-70053) и 3 гранта Президента РФ для молодых кандидатов наук (МК-5890.2013.1, МК-7596.2015.1, МК-6312.2018.1).

Часть результатов была выполнена при поддержке гранта Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (мегагрант № 075-15-2022-1114) и гранта РНФ (22-11-00091).

Считаем, что диссертация Волкова Григория Александровича на тему «Инкубационные характеристики предельных состояний сплошных сред» содержит новые результаты, которые позволяют объяснять различные эффекты, возникающие в нестационарных переходных процессах при высокоинтенсивных экстремальных воздействиях.

Работа хорошо оформлена, удовлетворяет всем необходимым требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук, и рекомендуется к защите по специальности 1.1.8 Механики деформируемого твердого тела.

Нарушения со стороны Волкова Григория Александровича

ФИО соискателя

п. 11 Приказа СПбГУ от «19» ноября 2021 г. №11181/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

и Приказа СПбГУ от 03.07.2023 № 9287/1

не выявлены

не выявлены, выявлены

Все основные выносимые на защиту научные материалы диссертации опубликованы в предложенных соискателем статьях.

Коллектив сотрудников Кафедры теории упругости рекомендовал диссертацию **Волкова Григория Александровича** по теме «**Инкубационные характеристики предельных состояний сплошных сред**» к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по научной специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

При проведении голосования коллектива сотрудников кафедры Теории упругости (протокол заседания № 44/8/22-02-7 от 29.08.2024) в количестве 15 человек, участвовавших в заседании из 17 человек штатного состава:

Проголосовали «за» 14 : (Волков Г.А. участие в голосовании не принимал),

«против»: 0 ,

«воздержались»: 0 .

Подписал: И.о. заведующего

(должность)

кафедрой теории упругости

(наименование структурного подразделения)

к.ф.-м.н.

(ученая степень)

ДОЦЕНТ

(ученое звание)



(подпись)

Б.Н. Семенов / 29.08.2024

Расшифровка подписи, дата