

## Отзыв официального оппонента

доктора технических наук, профессора Сапожникова Сергея Борисовича на диссертационную работу Феклистовой Евгении Вячеславовны «Моделирование процессов разрушения деформируемых тел: принципы алгоритмизации и анализ закономерностей», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

**Актуальность темы.** При проектировании ответственных конструкций авиационно-космической техники, работающей с малыми коэффициентами запаса прочности, математическое моделирование процессов деформирования и разрушения дает возможность получить информацию о закономерностях накопления повреждений и формировании условий разрушения, что имеет важное значение.

**Анализ содержания диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Материалы диссертации изложены на 132 страницах, включают 44 рисунка и 3 таблицы. Список литературы содержит 148 наименований.

**В первой главе** рассматриваются вопросы описания и характеристики закономерностей деформирования и разрушения твердых тел. Уделяется внимание вопросам моделирования процессов разрушения на различных структурно-масштабных уровнях. Приведены ссылки на работы, использующих различные модели механического поведения материалов для численной реализации процессов накопления повреждений в твердых телах. Отмечаются возможности моделирования процессов разрушения в современных программных комплексах, реализующих метод конечных элементов (КЭ).

*Замечание №1. Анализ предшествующих работ выполнен весьма неглубоко (подтверждение этому – небольшой объём главы – 9 с.). Критики приведённых подходов нет, есть лишь констатация. Без критики трудно выявить актуальные задачи для разработки в следующих главах диссертации.*

**Во второй главе** рассмотрены модели разрушения на основе использования совокупности критериев и схем изменения деформационных характеристик для изотропных и анизотропных материалов. Представлены граничные условия с учетом свойств нагружающих систем. Использована модель структурно-неоднородной среды, в которой уравнения равновесия выписаны без учета инерционных компонентов нагрузок.

*Замечание №2. Исключение сил инерции из уравнений состояния сводит явно динамический процесс разрушения к квазистатическому, что требует пояснений (с указанием границ применимости), а не простой констатации.*

Весьма интересным является использование критериев разрушения с введением констант с размерностью длины. Иными словами - с осреднением напряжений/деформаций в заданной подобласти – аналог представительного объема в нелокальной теории прочности (теории критических расстояний).

*Замечание №3. Стоило бы эти аналогии в литературном обзоре отметить.*

**Третья глава** раскрывает аспекты алгоритмизации численных решений краевых задач механики деформирования и разрушения неоднородных тел. Рассматриваются способы организации итерационных процедур с выбором шага, алгоритмы редуцирования жесткостей, учета неодновременности разрушения элементов, выбор степени дискретизации области, выбор способа учета нагружающих систем как дополнительной области.

Проведен анализ эффективности алгоритмов по совокупности отдельных факторов на примере задачи с эллиптическим концентратором.

*Замечание №4. В тексте диссертации, к сожалению, не обсуждается выбор конкретного вида концентратора. Представляется более обоснованным принятие концентратора в форме кругового отверстия, для которого в литературе имеется множество аналитических, численных решений и экспериментов на различных материалах.*

Показана необходимость проведения итерационной процедуры на каждом шаге до достижения устойчивого состояния. Предлагается «разрушать» один наиболее нагруженный КЭ за итерацию. Выдвинуто предположение о наличии у материала параметра с размерностью длины, подбор которого следует производить по результатам натуральных экспериментов для данного типа материала.

*Но самих экспериментов нет! См. Замечание №3 о необходимости более тщательного изучения публикаций по теме нелокальных теорий прочности.*

Получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ «Численное моделирование процесса разрушения упруго-хрупкого тела» и «Модуль учета деформационной анизотропии при численном моделировании процесса разрушения упруго-хрупкого тела».

*Автор здесь проявил свою высокую квалификацию как программист.*

**В четвёртой главе** проведён анализ закономерностей процессов разрушения тел с концентраторами напряжений при случайных значениях прочностных свойств элементов. Отмечена возможная реализация трёх типов накопления повреждений: локализованного, рассеянного и смешанного.

*Замечание №5. Рассматривается плоская задача с одним КЭ по толщине, автор делает вывод о реализации трёх типов накопления микроповреждений. Очевидно, что требуется подтверждение указанных закономерностей на основе решения задач в объемной постановке.*

Дальнейший анализ особенностей накопления микроповреждений и прочности в зависимости от характеристик разброса прочности выполнен для прежней схемы с одним КЭ по толщине и поэтому наследует прежнюю логику и результаты.

**В пятой главе** рассмотрено влияние формы концентратора на прочность и накопление повреждений в образцах с эллиптическим концентратором.

Сделан вывод, что, несмотря на существенное влияние геометрии концентратора напряжений на *несущую способность тела* и форму расчетной диаграммы нагружения, значение параметра  $r$  (длина выреза) не влияет на реализуемый тип накопления повреждений при равных значениях коэффициента вариации распределения пределов прочности конечных элементов. Этого следовало ожидать, поскольку после разрушения первого КЭ любой из рассмотренных концентраторов превращается в «трещину», развитие которой вполне типичное, так как материал тот же («изотропный упруго-хрупкий» по терминологии автора диссертации).

**Заключение и выводы** по работе вполне конкретные и обоснованные.

**Научная новизна диссертационной работы**, по мнению оппонента, состоит в следующем:

- предложен и реализован в виде комплекса программ новый алгоритм численного моделирования процессов разрушения тонкостенных конструкций из изотропных хрупких материалов, включающий генерацию случайных прочностных характеристик по заданному закону распределения, пересчет напряженно-деформированного состояния при разрушении отдельных конечных элементов, автоматический подбор шага нагружения, выбор перегруженного конечного элемента;
- впервые обнаружена немонотонность зависимости несущей способности тела от коэффициента вариации пределов прочности элементов, связанная с реализацией различных типов накопления повреждений (локализованный, смешанный, дисперсный);

- впервые обнаружено существование порогового значения коэффициента вариации пределов прочности структурных элементов, по достижении которого геометрия концентратора напряжений перестает влиять на процесс накопления микроразрушений.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в возможности применения разработанных алгоритмов и программ при проведении научно-исследовательских работ по моделированию процессов разрушения деформируемых тел, а также для решения прикладных задач прочностного анализа ответственных тонкостенных конструкций из изотропных хрупких материалов.

Получены свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ «Численное моделирование процесса разрушения упруго-хрупкого тела», «Модуль учета деформационной анизотропии при численном моделировании процесса разрушения упруго-хрупкого тела», «Программа для расчета коэффициентов перегрузки элементов структуры неоднородного тела».

*Замечание №6.* Для усиления практической значимости автору стоило бы указать методику экспериментального определения статистических характеристик распределения локальных пределов прочности материала как упруго-хрупкого тела.

**Достоверность научных результатов и обоснованность выводов** определяются качественным соответствием полученных результатов моделирования процессов разрушения с данными других авторов.

**Замечания** приведены курсивом в разделе отзыва, посвященном анализу содержания диссертации. Они носят в значительной степени редакционный характер и несущественно снижают ценность полученных результатов.


**Соответствие диссертационной работы указанной специальности.** Диссертационная работа Феклистовой Е. В. по содержанию и полноте изложенного материала соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Заключение.** Считаю, что диссертационная работа Феклистовой Евгении Вячеславовны «Моделирование процессов разрушения деформируемых тел: принципы алгоритмизации и анализ закономерностей» представляет собой законченную научно-квалификационную работу на актуальную тему, в которой решены современные научные задачи. Диссертационная работа соответствует требованиям п. 9, 10, 11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, требованиям

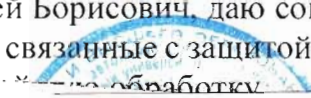
п. 8-11 Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденного приказом ректора ПНИПУ от 28.05.2024 г. № 27-О, а ее автор, Феклистова Евгения Вячеславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,

главный научный сотрудник кафедры технической механики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» доктор технических наук, профессор

  
Сергей Борисович Сапожников

«22» ноября 2024 г.

Я, Сапожников Сергей Борисович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Феклистовой Евгении Вячеславовны, и их дал  для обработки.

Подпись Сапожни

Сапожников Серг

ный сотрудник кафедры

тономного образовательного учреждения высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Адрес организации: ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»

Телефон: +7(912)795-72-71

E-mail: sapozhnikovsb@susu.ru

Наименование научной специальности, по которой была защищена докторская диссертация: 01.02.04 – Механика деформируемого твердого тела.