

Отзыв официального оппонента

доктора физико-математических наук Федулова Бориса Никитовича на диссертационную работу Феклистовой Евгении Вячеславовны «Моделирование процессов разрушения деформируемых тел: особенности алгоритмизации и анализ закономерностей», по специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, выполненную в ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

Диссертация Феклистовой Евгении Вячеславовны посвящена развитию методологии математического моделирования процессов разрушения деформируемых тел, направленной на исследование закономерностей разрушения хрупких материалов. Спектр задач, где используются хрупкие материалы, довольно широк: это и конструкционные материалы, такие как бетон, кирпич, мрамор, композиты, так и неконструкционные — горные породы, лед. Также важную роль в представленной диссертационной работе играет разброс свойств материала. Именно влиянию характеристик такого разброса и посвящен основной анализ в исследовании Феклистовой Евгении Вячеславовны. Поскольку разбросы как жесткостных, так и прочностных характеристик подобных материалов велики, а экспериментальные исследования с большим количеством повторений довольно затратны, то понимание того, что можно ожидать от материала особенно при высоких степенях разброса свойств даже на качественном уровне крайне **актуально**.

Основные выводы в представленном исследовании делаются на основе численного моделирования, а именно, метода конечных элементов. Все рассмотренные задачи относятся к области с концентратором напряжений при реализации плоского напряженного состояния. Во всех приведенных примерах рассматривается развитие дефектных структур.

Проделанная работа довольно трудоемка, потребовала большого количества расчетов и написания специальных программ. Задачи, которые ставит перед собой автор в данной работе требуют глубокого понимания принципов математического моделирования, применительно к механике деформируемого твердого тела, численных методов, а также, навыков программирования, так как те методы, которые используются автором не имеют стандартной реализации в готовом виде. Что говорит о **новизне** представленного диссертационного исследования.

В начале работы обоснована важность выбранной темы диссертации, определены цели и ключевые задачи исследования. Также изложены новые научные результаты, полученные в ходе работы, и подтверждена их достоверность.

Включены основные положения, а также рассмотрены теоретические и практические аспекты значимости исследования.

В **первой** главе работы рассматриваются ключевые аспекты, связанные с численным моделированием разрушения твердых тел. Проведен анализ существующих исследований, которые применяют разнообразные подходы и модели механического поведения материалов для численного изучения процессов накопления повреждений и равновесного роста трещин в твердых телах. Также исследуются возможности применения современных программных комплексов основанных на методе конечных элементов для решения задач моделирования процессов разрушения. Обзор работ полный, содержит 148 источников и позволяет сориентироваться в сути проблемы.

Во **второй** главе демонстрируются определяющие соотношения и вводятся параметры поврежденности. Вводятся критерии разрушения, привязанные к конечному числу механизмов. Рассматриваются изотропные и анизотропные материалы. Приведены способы учета стохастичности прочностных и деформационных характеристик материала. Предлагаются различные варианты вероятностных распределений для моделирования разброса свойств прочности материала.

Во **третьей** главе приводится алгоритм расчета эволюции поврежденных областей. Материал в некоторой области, где выполнен критерий разрушения, просто “исчезает”, образуя свободную поверхность. Анализируются варианты реализации такого алгоритма в зависимости от инкремента по нагрузке или граничным условиям. Делается важный вывод, что необходимо несколько раз сделать пересчет напряжений и характеристик материала прежде чем увеличивать нагрузку или нагружающие перемещения. Важно отметить, что автор использует нерегулярные расчетные сетки, что снимает многие противоречия связанные с выбором направления роста дефектов. Также анализируются различные варианты нагружающего окружения дефекта. Рассматриваются различные упругие неразрушаемые области вокруг дефекта.

В **четвертой** главе приводится анализ влияния на результаты процесса разрушения разброса свойств прочностных характеристик материала. Один конечный элемент рассматривается как минимальный структурный элемент где изменяются свойства. Сравниваются равномерное распределение и распределение Вейбулла, показано что характер накопления поврежденных областей различный.

В **пятой** главе рассматриваются геометрические характеристики задачи о растяжении тела с дефектом. Показано влияние длины дефекта. Проанализировано влияние размера конечного элемента. Видно, что при фиксированных параметрах распределения нет очевидной сходимости результатов. Что, по-видимому, связано с привязкой областей с изменяемыми свойствами непосредственно к элементам. На

основе этих данных автором делается вывод о выборе на основе дополнительной экспериментальной информации.

В **заключении** приведены основные научные и прикладные результаты диссертационного исследования.

В целом, можно отметить, что работа написана грамотным научным языком, материал изложен последовательно, логично, подробно и четко. В работе много понятных иллюстраций, которые делают материал изложения четким и понятным. В заключении автор делает выводы, соответствующие целям и задачам диссертационного исследования. Предложенные практические рекомендации обоснованы и вытекают из полученных результатов.

К работе есть следующие **замечания**:

1. В работе не упоминаются работы Качанова Л.М. и Работнова Ю.Н. посвященные накоплению повреждений, которые являются наиболее известными в мире по данной тематике. В этом же ключе можно сказать, что во введении нечетко обозначается место используемого алгоритма. Так как все современные алгоритмы сейчас используют либо эрозию элементов, то есть прогрессирующее разрушение, либо расщепление элементов, имеется в виду такие алгоритмы как когезионный контакт, VCCT и XFEM.

2. Не вполне понятна ситуация с критериями, их конечное число, а видов напряженного состояния бесконечно много, как быть если тип нагружения в точке среды не подходит не под один из перечисленных критериев? Элемент никогда не сломается?

3. В работе не вполне точно указан тип элементов, используемый в расчетах. Не понятно, как именно проверяется выполнение критерия, так как в элементе может быть несколько точек интегрирования в которых будут разные значения критерия.

4. В представленной работе области с различными свойствами привязаны непосредственно к элементам. Получается, что увеличение области автоматически снижает точность расчета. Интересно было бы отделить эти два понятия и, при одинаковой точности, рассмотреть изменение размера областей, где свойства постоянны.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования. Предложены новые алгоритмы и программы математического моделирования процессов разрушения, имеющие широкий спектр применения при оценке живучести элементов конструкций в различных областях исследований. Автореферат соответствует содержанию работы. Представленная соискателем диссертационная работа содержит новые научные результаты, объединенные единой смысловой линией, является законченным комплексным научно-исследовательским трудом на актуальную тему, выполненным автором самостоятельно на высоком научном уровне.

На основании вышесказанного можно утверждать, что диссертационная работа Феклистовой Евгении Вячеславовны на тему «Моделирование процессов разрушения деформируемых тел: особенности алгоритмизации и анализ закономерностей» является законченным комплексным исследованием, выполненным на высоком уровне. Работа соответствует паспорту специальности 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, удовлетворяет требованиям пп. 9-11,13,14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24 сентября 2013 г., требованиям п. 8-11 Порядка присуждения ученых степеней в ПНИПУ, утвержденного приказом ректора ПНИПУ от 28.05.2024 г. № 27-О, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор достоин присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент,

Доктор физико-математических наук, профессор кафедры теории пластичности, ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

___ Федулов Борис Никитович

«18» ноября 2024 г.

Место работы: ФГБОУ ВО Московский государственный университет им. М.В. Ломоносов

Адрес места работы: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1

Телефон: +7 9161316651

E-mail: fedulov.b@mail.ru

Подпись официального оппонента
Б.Н. Федулова заверяю
декан механико-математического
факультета член-корреспондент
РАН, профессор

Игоревич Шафаревич

