

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Епифанова Виктора Павловича
на тему «Акустические методы в механике деформирования и разрушения
пресноводного поликристаллического льда»,
представленную на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук по специальности
01.02.04 – Механика деформируемого твёрдого тела

1. Структура и объем диссертации. Диссертационная работа содержит введение, четыре главы и список литературы из 324 источников, изложена на 211 страницах (включая библиографический список), содержит 130 иллюстраций и 23 таблицы. Изложение материала четко подчинено раскрытию поставленных целей и задач исследования.

2. Актуальность исследования. При оценке актуальности диссертационной работы отметим сначала внутреннюю логику развития механики деформируемого твердого тела в области теоретического и экспериментального исследования деформируемости и разрушения специфического материала — пресноводного поликристаллического льда, связанную с исследованием многоиерархической его структуры в температурно-силовом поле, исследованием микромеханизмов формирования текстуры, фазовых переходов и других факторов, вследствие которых и формируется макроскопическое напряженно-деформированное состояние. Такого рода теоретические исследования являются обоснованием применимости и выбора тех или иных методов экспериментального исследования ледопородных сред, в данной работе — акустических методов, наиболее чувствительных к структурным изменениям исследуемого автором материала.

Внешняя же логика развития данного направления диктуется прикладными задачами геомеханики движения ледопородных грунтов, строительства зданий и сооружений в условиях вечной мерзлоты, функционирования морского и речного транспорта при наличии ледового покрова и родственными проблемами в поле отрицательных температур.

Изложенные проблемы требуют систематизации как теоретических, так прикладных научных результатов. Поскольку рецензируемая работа

затрагивает отмеченный широкий круг научных и прикладных проблем и дает ответ на многие из них, то актуальность данной работы не вызывает сомнений.

3. Основные результаты и научная новизна. Основной научный результат данной работы состоит в разработке комплексного метода исследования кинетики напряженно-деформированного состояния, изменения микроструктуры, фазовых переходов, накопления поврежденности и формирования трещин в процессах квазистатического и динамического режимов температурно-силового нагружения на основе экспериментальных средств и теоретических положений механики деформируемого твердого тела с синхронным применением сканирующих акустических импульсов и деформационной акустической эмиссии. С одной стороны, традиционными экспериментальными и теоретическими методами определяются деформационные макро- и микрохарактеристики льда, его зерновая структура, дефектность (поврежденность), формирование поля трещин, создание особых областей в материале при различных видах напряженного состояния и т. д., с другой стороны, эти же состояния анализируются с позиций выходных параметров акустических исследований. Поэтому такое сопоставление позволяет создать определенные «карты» типа «микро- и макродеформации и напряжения, структура, поврежденность и т.д.» — «выходные характеристики акустической эмиссии и амплитудно-фазового метода». Несмотря на то, что диссертант занимался прямыми методами исследования, эти «карты» можно использовать и для обратных задач: по выходным параметрам акустических методов судить о состоянии напряженно-деформированного состояния и поврежденности ледопородных грунтов в реальных процессах в условиях естественного нагружения. Как следствие, появляется возможность прогнозирования состояния льда на основе акустических (неразрушающих!) средств контроля.

Диссертантом получено огромное число новых результатов частного характера, по-сути и составляющих основу изложенной выше концепции его работы. Отметим ряд наиболее важных из них.

Во-первых, отметим новые результаты многоплановых экспериментальных исследований в области упругости пресноводного льда при линейных и нелинейных деформациях.

Здесь следует отметить акустико-механический способ определения физического предела упругости льда и интервалы его изменения; экспериментально подтвержденный факт почти ступенчатого уменьшения упругих характеристик при плавлении более чем в 7 раз (аналогичный эффект наблюдается у кристаллов с упорядоченной кристаллической решеткой при отсутствии области предплавления); определение баланса диссипации энергии упругих волн, связанных с вязкими потерями на мезоуровнях (21%), и с рассеянием акустической энергии на межкристаллитных поверхностях (79%); выполнена классификация подобластей пластического течения, трещинной дилатансии и хрупкого разрушения в процессе реологического деформирования на основе анализа зависимостей пороговых напряжений трещинообразования и временного сопротивления от приведенной скорости деформации; рассчитаны параметры дислокационной сетки на основе анализа и синтеза акустических измерений.

Заслуживает внимания цикл экспериментальных и теоретических исследований количественного определения структурных изменений льда непосредственно в процессе механических испытаний на сжатие, растяжение и удар в линейной и закритической областях нагружения на основе ультразвукового прозвучивания и регистрации сигналов акустической эмиссии. Так, в условиях растяжения соискателем введен параметр дефектности, учитывающий накопление микродефектов, и дана методика его идентификации импульсно-фазовым методом. При исследовании движения фронта магистральной трещины установлено формирование зоны предразрушения («пластичности»), размеры которой на порядки превышают зоны пластического течения в соответствии с моделью Хеллана-Ирвина. Реализован экспериментальный (акустический) метод определения страгивания трещины с использованием коэффициента трещиностойкости K_{IC} .

При исследовании в области сжатия установлено, что в диапазоне 0,5-80 МГц избыточный коэффициент ослабления упругих волн возрастает

более чем на три порядка при деформационном накоплении трещин, что является важным фактом «диагностики» макроструктурного состояния льда. Детально исследована реология трещиноватого льда и определены характерные времена релаксационных процессов при деформационном изменении структуры льда. Совокупность отмеченных фактов позволяет по изменению акустических свойств льда определять момент образования и роста трещины, кинетику их формирования и взаимодействия.

При исследовании неупругого удара разработаны оригинальная новая методика и собственно экспериментальная установка, позволяющие определять мгновенные характеристики удара. Из результатов отметим, что при ударе в зоне контакта формируется промежуточный слой льда, структура которого обладает повышенной текучестью. Построена обобщенная зависимость приведенного напряжения от приведенной мгновенной скорости удара, результаты расчета по которой сопоставлены с классическими моделями. Существенный научный вклад внесен в решение контактных задач и установлено определяющее влияние промежуточного слоя на контактную прочность льда с подложкой. Показано, что формирование промежуточного слоя сопровождается разрушением адгезионного контакта, перестройкой первичной структуры льда и образованием вторичной мелкокристаллической структуры с динамической вязкостью на несколько порядков ниже ее значения по сравнению с исходным состоянием льда. Особо отметим задачу выдавливания льда из матрицы с конфузуром. Здесь установлено, что пресноводный лед со сверхпластичной структурой движется в центре канала как твердое тело, у стенок канала наблюдается прилипание, а в промежуточном слое — вязкое течение, обусловленное сдвиговыми напряжениями. Важную роль в прикладных задачах (движение ледников, скол намерзания льда на технические объекты и т. д.) играют выполненные исследования по влиянию формы препятствия, миделева сечения, обратной температуры, шероховатости, примесей органического происхождения, условий стеснения (гидростатического давления) на сопротивление отрыва и сдвига льда от подложки.

В заключение отметим, что все полученные научные результаты и выводы работы полностью соответствуют пунктам

- 1) установление законов деформирования, повреждения и разрушения материалов;
- 3) выявление новых связей между структурой материалов, характером внешних воздействий и процессами деформирования и разрушения;
- 5) планирование, проведение и интерпритация экспериментальных данных по изучению деформирования, повреждения и разрушения материалов

целей исследования и пунктам

- 1) законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых;
- 2) теория моделей деформируемых тел с простой и сложной структурой;
- 3) мезомеханика многоуровневых сред со структурой;
- 6) теория накопления повреждений, механика разрушения твердых тел и критерии прочности при сложных режимах нагружения;
- 9) экспериментальные методы исследования процессов деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе объектов, испытывающих фазовые структурные превращения при внешних воздействиях

области исследования паспорта специальности 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела.

4. Теоретическая и практическая ценность результатов. При анализе теоретической и практической значимости полученных результатов следует отметить, что с точки зрения внутренней логической завершенности работы диссертантом сделан существенный шаг в разработке научной проблемы в области разработки многоиерархических реологических моделей феноменологического типа для моделирования деформационного поведения и разрушения ледопородного материала в разнообразных условиях температурно-силового и динамического нагружений, учитывающих кинетику микроструктуры и фазовые переходы пресноводного поликристаллического материала. Теоретические результаты и методика экспериментального исследования можно трактовать как акустико-механический метод исследования эволюции деформируемости и разрушения

льда, область применения которого выходят далеко за пределы тематики диссертационной работы.

С другой стороны, с точки зрения внешней логической завершенности работы (ее связи со смежными отраслями науки и чисто прикладными проблемами) отметим, во-первых, разработку ряда технических устройств для оценки неразрушающегося контроля текущих механических, электрических и акустических сигналов. Во-вторых, полученные результаты имеют ясные и понятные пути использования для задач прогнозирования деформационного поведения и механических свойств не только ледопородных материалов, но других материалов в геомеханике, а также при решении природных проблем лавиноопасности, строительстве в условиях вечной мерзлоты, эксплуатации элементов конструкции и объектов в условиях низкой температуры и других инженерных задачах. Очевидно, что все теоретические и экспериментальные методические разработки будут полезными в научных исследованиях академических институтов, организациях Высшей Школы и отраслевых научно-исследовательских институтах, занимающихся подобными проблемами.

5. Апробация работы. Основные положения рецензируемой работы более чем в достаточной мере (для диссертаций на соискание ученой степени доктора наук) опубликованы в научных рецензируемых журналах из перечня ВАК, включая 27 публикаций в изданиях из библиометрических баз данных Web of Science и Scopus, и материалах ряда Международных и Всероссийских конференций. Работа выполнялась в рамках четырех грантов РФФИ и программе «Арктика» ИПМех РАН, которые проходят тщательную научную экспертизу при их одобрении. Она полностью докладывалась на двух научных семинарах в ведущих научных школах в области МДТТ. Отметим, что результаты научных исследований легли в основу ряда технических решений, составляющих суть пяти авторских свидетельств на изобретения и патенты.

Поэтому считаю, что рецензируемая диссертационная работа в достаточной мере опубликована и апробирована.

6. Достоверность и обоснованность результатов диссертации сомнений не вызывает. Основные положения диссертации в достаточной

мере обоснованы и логически вытекают из поставленных диссертантом целей и задач исследования. Достоверность результатов обеспечивается в целом корректностью постановок «физических» и математических задач, непротиворечивостью полученных соискателем экспериментальных и теоретических результатов теоретическим, экспериментальным и качественным результатам работ других авторов, строгостью использования основных положений механики деформируемого твердого тела и элементов физики твердого тела, использованием оригинальной и теоретически обоснованной методики экспериментального исследования. Соблюдается принцип вложенности, когда результаты диссертационной работы соискателя в частных случаях совпадают с известными теоретическими решениями и экспериментальными результатами других авторов.

7. Диссертация и автореферат написаны понятным научным языком. Содержание диссертации достаточно полно, подробно и ясно раскрывает постановку, методы и результаты решения рассмотренных задач. Автореферат в целом отражает содержание диссертации, хотя и имеются в этом плане некоторые замечания, о чем речь пойдет ниже. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует существующим требованиям.

8. Замечания по содержанию и оформлению работы. Недостатков, ставящих под сомнение справедливость какого-либо результата, в диссертации не обнаружено. Тем не менее замечания по диссертационной работе Елифанова Виктора Павловича можно квалифицировать как по оформлению диссертации, так и по существу работы.

По существу работы можно сделать следующие замечания.

1. Имеется некоторая несогласованность пунктов «Общая характеристика работы» автореферата и «Введение» диссертации. В автореферате отсутствует пункт «Положения, выносимые на защиту», который имеется в диссертации.

2. Вызывает вопросы использование «закона течения Глена» в виде (1.5) или (1.6), (1.7) (и далее в главе 3) для описания деформации ползучести, поскольку это законы установившейся (неизотермической) ползучести, введенные Бейли в публикациях 1929 и 1935 г.г. Описать этими уравнениями

первую и третью стадии ползучести невозможно, хотя один из вариантов — кусочно-линейная аппроксимация кривой ползучести с различными значениями показателя нелинейности в степенной аппроксимации скорости деформации от напряжения, о чем диссертант упоминает в своей работе (стр. 30 и далее). Для описания разупрочнения при ползучести есть хорошо отработанный подход — кинетические уравнения Ю.Н. Работнова. Поэтому достаточно уравнения типа (1.6) дополнить, например, кинетическим уравнением для структурного параметра d — размера зерна. Вообще говоря, при построении и использовании реологических соотношений диссертант (без комментариев и обоснования) использует в некоторых случаях нелинейные модели ползучести (типа (3.1)), в других случаях — линейные модели вязкоупругости типа (3.30). Здесь следует также отметить, что часто диссертант использует термин «Реологическое уравнение», понимая под этим обычную аппроксимацию. Но реологическое уравнение (модель) позволяет вести расчет при любом законе температурно-силового нагружения, в отличие от аппроксимационных зависимостей.

3. В основном все результаты получены соискателем в лабораторных условиях. Им фактически составлены карты «напряженно-деформированное состояние, текстура, микроструктура, внешнее температурно-силовое нагружение» — «параметры импульсно-фазового метода или акустической эмиссии». Однако перенос полученных результатов на природные, технические или иные процессы требует исследований по выявлению влияния масштабного фактора на отклик акустических методов на те или иные возмущения. Соискатель в диссертации не сформулировал свое видение решения этой задачи.

К замечаниям, связанными с оформлением работы и изложением материала, можно отнести следующие.

4. Нестандартно подготовлен список цитируемой литературы в диссертации, где отсутствует нумерация источников. Это создает определенный дискомфорт «читателю» при изучении диссертационной работы.

5. Несколько необычна используемая для описания свойств и деформируемости льда терминология: «отжиг» (при отрицательных

температурах), «задержанная упругость» (вязкоупругая деформация), «пластичность» (может быть лучше использовать термин «склерономная необратимая деформация») и некоторые другие. В частности, для классической деформационной кривой ползучести «деформация — время» некорректно ее стадии называть стадиями пластической деформации (стр. 26, рис. 1.13), поскольку это можно было бы делать, если бы деформация ползучести была бы необратимой. Однако, как следует из исследований соискателя (рис. 3.19) (и других авторов), при разгрузке наблюдается обратимая деформация льда.

В незначительном количестве имеются опечатки: например, на стр. 85 в тексте диссертации вместо ссылки на рис. 1.10 должна быть ссылка на (2.29); на стр. 86 вместо ссылок на рис. 1.31 и 1.32 должны быть ссылки на (2.31) и (2.32); на стр. 103 в формуле (3.12) вместо $K_{ис}$ должно быть $K_{ис}$; в публикациях №22 и 23 автореферата ошибочно указан источник, как «Известия РАН. ММТ» вместо «Известия АН СССР. МТТ».

Разумеется, отмеченные недостатки носят частный характер и ни в коей мере не влияют на общую положительную оценку работы Епифанова Виктора Павловича.

9. Заключение по диссертации. Оценивая работу в целом, считаю, что диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной соискателем самостоятельно и на достаточно высоком научном уровне. Совокупность научных исследований можно классифицировать как научное достижение в области исследования кинетики реологического деформирования, разрушения и состояния структуры специфического материала — пресноводного льда — при различных видах квазистатического и динамического режимов термо-силового нагружения с использованием комплексного подхода, базирующегося на теоретико-экспериментальных механических и акустических методах.

Полученные результаты достоверны, выводы и умозаключения обоснованы. Работа базируется на достаточном объеме полученных теоретических и экспериментальных результатов и вносит существенный вклад в соответствующий раздел механики деформируемого твердого тела.

Исходя из вышеизложенного, считаю, что диссертационная работа «Акустические методы в механике деформирования и разрушения пресноводного поликристаллического льда» соответствует специальности 01.02.04 — «Механика деформируемого твердого тела», имеет важное научное и практическое значение, соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», а её автор — Елифанов Виктор Павлович — заслуживает присуждения ему учёной степени доктора физико-математических наук по указанной специальности.

Официальный оппонент:

заведующий кафедрой «Прикладная математика и информатика» Самарского государственного технического университета,
доктор физико-математических наук (01.02.04),
профессор

Радченко Владимир Павлович

Подпись В.П. Радченко заверяю
Ученый секретарь
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный технический
университет»,
доктор технических наук



Малиновская Юлия Александровна

23 апреля 2018 года

Служебный телефон:
8(846)3370443
E-mail: radch@samgtu.ru
Служебный адрес:
443100, г. Самара
ул. Молодогвардейская, 244,
Главный корпус СамГТУ,
кафедра «Прикладная математика и информатика»