



**МОСКОВСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**  
имени М.В. ЛОМОНОСОВА  
(МГУ)

**МЕХАНИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЙ  
ФАКУЛЬТЕТ**

Ленинские горы, д.1, Москва, ГСП-2, 119991  
Телефон: 939-12-44, Факс: 939-20-90

**«У Т В Е Р Ж Д А Ю»**

И.о. декана механико-  
математического  
факультета МГУ имени  
М.В. Ломоносова,  
д.ф.-м.н., профессор



В.Н. Чубариков

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова»  
на диссертацию В.П.Епифанова «Акустические методы в механике  
деформирования и разрушения пресноводного поликристаллического  
льда», представленную на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук по специальности 01.02.04 –  
механика деформируемого твёрдого тела»

Как известно, лёд – один из существенных факторов в жизнедеятельности человека, оказывающий глобальное влияние на климат в планетарном масштабе. В последние десятилетия в связи с освоением территорий Крайнего Севера и Сибири приобретает большую важность теоретическое и экспериментальное исследование напряжённо-деформированного состояния, микроструктуры и механизмов разрушения пресноводного поликристаллического льда под действием силовой массовой либо поверхностной нагрузки. Такой типичной динамической нагрузкой может быть приземляющееся на ледовый покров воздушно-транспортное средство. В материале льда преобладают процессы изменения структуры, накопления дефектов как в линейной стадии нагружения, так и в начале трещинообразования. Поэтому применение акустических методов, активно развиваемых в данной работе, с помощью которых можно обосновывать выбор тех или иных определяющих соотношений на разных стадиях процесса деформирования, а также вопросы формирования промежуточных слоёв при истечении и ударе, представляются актуальными и важными в механике льда как сложившемся самостоятельном направлении механики деформируемого твёрдого тела.

Работа состоит из введения, четырёх глав, раздела «Основные выводы и результаты» и списка литературы; её объём – 211 страниц, в тексте имеются 130 рисунков и 23 таблицы.

Во **введении** приводится содержательный исторический обзор по выбранной тематике, обосновывается её актуальность, формулируются полученные результаты с анализом их новизны, достоверности, теоретической и практической значимости, перечисляются использованные экспериментально-теоретические методы и подходы.

**Глава 1** содержит обзор литературы по имеющимся акустическим методам в механике деформирования, разрушения и адгезионной прочности пресноводного льда и их использовании при анализе таких процессов как накопление повреждений, изменение микроструктуры, начало трещинообразования. В п. 1.3 подробно описывается созданный автором в Институте проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН измерительный акустический комплекс ТРЕК, обосновывается принципиальный выбор акустико-резонансных методов как обладающих повышенной чувствительностью к структурным особенностям материала. Здесь прежде всего идёт речь о методах прозвучивания и акустической эмиссии.

Важным выводом главы является утверждение о том, что структура промежуточного слоя – ключевой фактор в оценке адгезионной прочности соединения лёд – подложка.

**В главе 2** содержатся результаты экспериментов по анализу микромеханики пресноводного поликристаллического льда с помощью импульсно-фазового метода в области упругого деформирования при малых и конечных деформациях. Акустические измерения при конечных деформациях производились на созданном автором акустико-механическом стенде на базе испытательной разрывной машины FM-1000 с термостатирующей камерой. Возможность применения ультразвуки проверяется соблюдением квадратичной зависимости коэффициента поглощения звука от частоты и его независимостью от амплитуды волны.

Описываются возможные механизмы упругих потерь акустической энергии такие, как стоксов механизм, рассеяние ультразвука на неоднородностях, дислокационное трение. Приводятся данные о влиянии микродефектов на упругие свойства льда. Большое внимание уделяется скачку скорости звука при плавлении, поглощению ультразвука, упругой анизотропии, энергии активации.

**Глава 3**, представляющаяся центральной в диссертации, посвящена кинетике накопления деформационных дефектов и механизмов разрушения пресноводного льда при динамическом растяжении-сжатии и ударе. Предлагаются и обосновываются различные определяющие соотношения в виде реологических связей напряжений и деформаций (с учётом температурно-временной аналогии), материальные коэффициенты в которых находятся с помощью разработанного измерительного устройства – пенетрометра. К числу таких материальных констант принадлежит и степень трещиноватости, существенно влияющая на реологию льда. Доказывается, что



разрушению предшествует некоторая предельная трещиноватость (дефектность). Вычисляется суммарный коэффициент поглощения ультразвука, увеличивающийся пропорционально напряжению сжатия. Большое внимание уделяется моделированию перехода льда из вязкоупругого (текучего) в стеклообразное состояние.

Исследуется процесс квазистатического и динамического внедрения жёсткого сферического индентора в пластину, лежащую на массивном основании. Из осциллограммы ударного импульса находится зависимость среднего контактного давления от глубины внедрения.

**Глава 4** посвящена контактному разрушению льда и привлечению для анализа этой модели промежуточного слоя. Данная модель позволяет делать вывод об адгезионной прочности соединения льда с подложкой на отрыв и сдвиг, визуализировать разрушение при фрикционном контакте в задачах обтекания препятствий, устанавливать связь между микроструктурой льда и его макрохарактеристиками, находить зависимость параметров движения от шероховатости подложки. Кинетика изменения структуры основана на выбранной автором простой цепочечной модели гармонического осциллятора. Прослеживается тенденция к достижению равновесного размера зерна при интенсивном пластическом деформировании и к формированию той или иной стереометрической текстуры.

Находится распределение скоростей в струе льда при блоковом и сплошном течении. Выделяются три слоя, в единственном из которых (промежуточном) реализуется вязкопластический сдвиг, т. е. движение как сплошной среды. Экспериментально исследуется взаимодействие струи с препятствием и его обтекание с учётом абразивных и режеляционных эффектов.

В разделе «**Основные выводы и результаты**» формулируются основные результаты диссертации по главам, подводятся итоги, делаются выводы и обозначаются перспективы.

**Научная новизна и теоретическая значимость** работы состоит в разработке и апробации на большом количестве задач механики льда оригинального акустико-механического метода определения деформационных дефектов, микроструктуры (текстуры) и параметров контактного разрушения пресноводного льда непосредственно в процессе испытаний. Метод реализован на созданном автором акустическом измерительном комплексе. В установочных экспериментах указаны реализуемые способы нахождения материальных функций. Найдены новые физико-механические и термические свойства промежуточного слоя, образующегося на фрикционном контакте, которые позволяют судить об адгезионной прочности соединения льда с подложкой, что имеет большое теоретическое значение в механике разрушения.

**Практическая значимость** диссертационной работы заключается в том, что разработанный в ней акустико-механический метод имеет достаточно общий характер и может применяться в различных инженерных областях для диагностики напряжённо-деформированного состояния и нача-

ла развития дефектов и трещиноватости. Данные результаты представляются существенным вкладом в экспериментальную механику деформируемого твёрдого тела. Они с успехом могут найти применение в практике проектных организаций машиностроительной и судостроительной отраслей, в научно-исследовательской деятельности таких учреждений, как Институт проблем механики им. А.Ю.Ишлинского РАН, Институт машиноведения им. А.А.Благонравова РАН, Институт Арктики и Антарктики РАН, в учебной работе при создании новых спецкурсов в таких вузах как МГУ им. М.В.Ломоносова, МГТУ им. Н.Э.Баумана, МГРИ-РГГРУ им. С.Орджоникидзе и других.

**Достоверность** выводов и заключений вытекает из использования классического аппарата механики сплошной среды и математического анализа. Результаты выдерживают тесты на сравнение с признанными результатами других авторов; теоретические выводы находят подтверждение с экспериментами, в том числе поставленными самим соискателем.

Основные **результаты работы** отражены в 30 публикациях автора в международных высокорейтинговых специализирующихся по механике деформируемого твёрдого тела и акустике журналах. Они апробированы на ведущих научно-исследовательских семинарах и научных мероприятиях, в том числе на V-XI Всесоюзных и Всероссийских съездах по теоретической и прикладной механике, Международных Симпозиумах «Snowsymp-94» (Индия, 1994), «Interpraevent-96» (Германия, 1996), Всесоюзных конференциях по механике и физике льда. Можно утверждать, что результаты работы получили международное признание. Автореферат соответствует содержанию диссертации и позволяет составить достаточно полное представление о ней.

По тексту диссертации имеются следующие **вопросы, замечания и комментарии**.

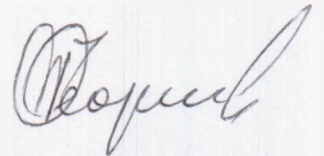
- 1) Судя по обозначенным целям диссертации, на выходе логично было бы ожидать структуризацию определяющих соотношений материала льда на тех или иных характерных временах, при тех или иных условиях воздействия, силовых нагрузках, терморежимах и других факторах. В итоге прослеживаются лишь элементы такой структуризации, или классификации.
- 2) Требуется обоснование взятых из теории Герца эмпирических формул (3.70), (3.71) и выводов из них (с. 149) для проводимого в работе моделирования упругопластического и вязкоупругого ударного взаимодействия. Сюда же относится и обоснование вида мгновенного модуля упругости (3.68).
- 3) На с. 84 терминологически не вполне чётко на языке механики деформируемого твёрдого тела сформулирована фраза: «Отклонения от упругого поведения для льда проявляются в явлении запаздывающей или задержанной упругости». По контексту можно понять, что таким образом автор характеризует вязкоупругие эффекты.



Сделанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы. Она выполнена на высоком механико-математическом и физическом уровне, содержит новые результаты и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК России к докторским диссертациям по специальности 01.02.04 – механика деформируемого твёрдого тела. Её автор, Виктор Павлович Епифанов, несомненно, заслуживает присуждение ему искомой степени доктора физико-математических наук.

Результаты диссертации были доложены соискателем 21 февраля 2018 г. на научно-исследовательском семинаре им. А.А.Ильюшина кафедры теории упругости МГУ имени М.В.Ломоносова и получили положительные отзывы специалистов. Настоящий отзыв на диссертацию В.П.Епифанова рассмотрен и одобрен 21 марта 2018 г. (протокол № 6) на заседании кафедры теории упругости МГУ имени М.В. Ломоносова.

Заведующий кафедрой теории упругости  
МГУ имени М.В.Ломоносова,  
доктор физико-математических наук, профессор



Д.В.Георгиевский

Телефоны: 8-495-939-55-39, 8-916-817-57-57

E-mail: [georgiev@mech.math.msu.su](mailto:georgiev@mech.math.msu.su)

28 марта 2018 г.