

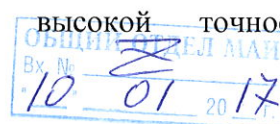
## ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук  
Цысаря Сергея Алексеевича на диссертационную работу Ненарокова Кирилла Алексеевича «Разработка методов дефектоскопии тепловой защиты надувных тормозных устройств спускаемых космических аппаратов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летальных аппаратов

Диссертационная работа Ненарокова К.А. посвящена анализу проблемы дефектоскопии гибких теплозащитных покрытий (ТЗП) надувных тормозных устройств спускаемых аппаратов (НТУ СА). Данная проблема является особенно актуальной при производстве и экспериментальной отработке подобных конструкций. Целью диссертации является разработка и применение экстремальных методов решения обратных задач математической физики для параметрической идентификации математических моделей распространения акустических волн в материалах ТЗП для определения в системах неразрушаемой теплозащиты и теплоизоляции.

Решение практически важных обратных задач математической физики, разработка эффективных вычислительных алгоритмов их приближенного решения во многом определяют успех применения вычислительных средств в прикладном математическом моделировании. Обратные задачи математической физики, как правило, принадлежат к классу некорректных задач в классическом смысле, при этом математическая некорректность проявляется, в частности, как неустойчивость решения обратной задачи по отношению к малым возмущениям входных данных. Следует отметить, что рассматриваемая в работе задача для гиперболического уравнения является условно-корректной, и автором показано, что применение традиционных регуляризирующих алгоритмов для решения условно-корректной задачи приводит к существенному уменьшению влияния погрешностей исходных данных. Данная проблема имеет большое практическое значение, в частности, при исследовании процессов распространения продольных волн в элементах конструкций, как летательных аппаратов, так и других образцов техники. Подход, разработанный автором для решения данных задач, основывается на итерационных методах решения обратных задач в экстремальной постановке. В связи с постоянно возрастающими требованиями к эффективности механических испытаний, направление исследований, проведенных в работе Ненарокова К.А., несомненно является актуальным.

Достоверность и точность разработанных математических моделей, описывающих процессы распространения акустических волн в анализируемых теплозащитных и теплоизоляционных материалах, подтверждена достаточно



экспериментально- расчетных результатов определения геометрических характеристик искусственно созданных (а потому априорно известных) дефектов рассмотренных материалов. Применение разработанных в диссертации алгоритмов при дефектоскопии теплозащитных покрытий летательных аппаратов может привести к значительному повышению эффективности экспериментальной отработки с целью повышения надежности функционирования анализируемых систем. Разработанные в работе итерационные методы решения обратных задач и соответствующее программное обеспечение могут найти широкое применение при решении многих других прикладных проблем в энергетике, машиностроении, медицине.

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Введение содержит формулировки задач и целей работы, а также обоснование актуальности выбранного направления исследований.

В первой главе автором на основе проведенного анализа общих методических вопросов дефектоскопии методами нелинейной акустики сформулированы цели и задачи проводимого исследования для случаев гибких ТЗП летательных аппаратов. Также были сформулированы основные требования к построению, структуре и составу подобных экспериментально-расчетных систем, позволяющих учитывать разные факторы и механизмы возникновения дефектов в исследуемом многослойном теплозащитном покрытии.

Во второй главе автором приводится разработанный алгоритм решения обратной задачи нелинейной акустики с применением метода итерационной минимизации среднеквадратичного функционала невязки расчетных и экспериментально измеренных акустических давлений. Примененный подход к параметрической идентификации рассматриваемой математической модели с использованием сопряженной задачи для вычисления градиента функционала невязки целесообразен с точки зрения вычислительной эффективности данного алгоритма. Автором были получены аналитические выражения для вычисления градиента функционала при произвольных граничных условиях и схемах установки датчиков давлений в образце исследуемого материала.

В третьей главе автором приводится разработанный вычислительный алгоритм решения поставленной задачи. В качестве численного метода решения задачи был выбран метод конечных разностей, как хорошо себя зарекомендовавший для подобного рода задач. Для случая многослойного теплозащитного покрытия были получены конечно-разностные аппроксимации коэффициентов дифференциального уравнения.

В четвертой главе представлены результаты обработки данных модельных экспериментов и результаты решения обратных задач с учетом погрешностей задания начальных значений искомых параметров, задания погрешностей измерения акустических

давлений, погрешностей априори известных коэффициентов математических моделей. Представленные результаты моделирования позволяют сделать вывод о достаточно высокой устойчивости предлагаемого вычислительного алгоритма к подобного рода погрешностям.

В пятой главе автором приводятся данные об апробации разработанного алгоритма при обработке данных реальных акустических экспериментов с реальными теплозащитными материалами при наличии искусственно созданных дефектов различной природы. С практической точки зрения эта глава является наиболее интересной. На первом этапе исследований рассматривались образцы гибкого теплозащитного материала, для которых с помощью предлагаемой методики проводилось определение наличия дефектов. На втором этапе исследований проводилось расчетно-экспериментальное определение геометрических параметров предварительно обнаруженных дефектов. Отличительной особенностью данных исследований является то, что для получения результата из-за особенностей конструкции НТУ датчики устанавливались только с внешней стороны исследуемых образцов. Приведенные результаты апробации предлагаемого в работе подхода позволяют говорить о возможности использования данного метода при проведении ускоренных испытаний теплозащитных конструкций с целью дефектоскопии.

Содержание автореферата соответствует содержанию диссертации.

По представленной работе можно сделать следующие замечания:

1. При поиске дефектов в нагружаемых (внешним давлением) образцах акустическими методами приходится оперировать величинами как нагрузочного (статического или квазистатического) давления, так и акустического давления. В первой главе эти два понятия чётко разделены, однако в дальнейшем конкретизация пропадает, и остаётся один термин давления, что может привести читателя в заблуждение. Так, например, во второй главе на с. 70 говорится о максимальном значении давления, достигаемого на датчиках; в четвертой главе на с. 89 упоминается о числе точек измерения давления.

2. Было бы полезным провести краткое сравнение разрабатываемого метода нелинейной диагностики с традиционным линейным методом неразрушающего ультразвукового контроля, тем более, что характерные акустические параметры материала теплозащиты НТУ СА (плотность и скорость звука порядка  $1000 \text{ кг/м}^3$  и  $1500 \text{ м/с}$  соответственно) позволяют использовать стандартные диагностические системы.

3. В тексте диссертации присутствует незначительное количество опечаток. Так, например, в первой главе на стр.16 некорректной является фраза «...макеты подвергалось...», в подписи к рисунку 1.4 пропущено слово «устройство» и пр., а также присутствует некоторое количество пунктуационных недочётов.

Тем не менее, указанные недостатки никак не влияют на сугубо положительную оценку в целом диссертационной работы К.А. Ненарокова. Таким образом, можно заключить, что диссертация представляет собой законченное исследование, выполненное на высоком научно-техническом уровне, имеет важное практическое значение и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым ВАК к кандидатским диссертациям. Следует отметить, что результаты своих исследований К.А. Ненароков неоднократно докладывал на национальных и международных конференциях, а также они были опубликованы в периодических изданиях, рекомендуемых ВАК, что дало возможность достаточно полно ознакомиться с его работой. Ненароков Кирилл Алексеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летальных аппаратов.

Старший научный сотрудник кафедры фотоники и  
физики микроволн физического факультета  
МГУ имени М.В. Ломоносова, к.ф.-м.н.



С.А. Цысарь

Подпись Цысаря С.А. заверяю

