

ОТЗЫВ

официального оппонента

Панькова Андрея Анатольевича

на диссертацию Савиновой Елены Владимировны

«Исследование связанных нестационарных термоэлектроупругих полей
в сплошных круглых пластинах»,

представленную на соискание учёной степени кандидата технических
наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела

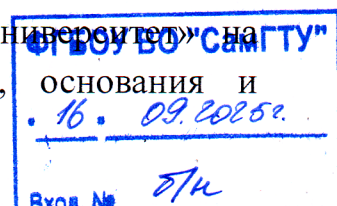
Актуальность. Пьезоэлектрические элементы широко применяются в качестве сенсоров, генераторов, силовых приводов, преобразователей механической энергии в электрическую и наоборот и имеют различную форму, в частности, цилиндров или пластин в виде дисков или колец из поляризованной керамики, например, PZT, ЦТС или полимера PVDF. Математическое моделирование функционирования пьезоэлектрических устройств: сенсоров и актюаторов различных типов основывается на постановке и решении аналитическими или численными методами, например, методом конечных элементов связанной краевой задачи термоэлектроупругости для заданной расчетной области с учетом ее конструктивных особенностей, в общем случае, при нестационарном характере динамических условий электромеханического и теплового нагружений. При этом точные аналитические решения краевых задач электроупругости известны лишь для ограниченного круга задач, как правило, для областей канонических форм и стационарном нагружении и используются для уточненного описания процессов функционирования, установления математических закономерностей взаимодействий полей различной физической природы, анализа и поиска оптимальных конструктивных параметров разрабатываемых устройств и верификации решений, полученных приближенными численными методами.

Анализ современных российских и зарубежных научных публикаций по методам математического моделирования и решениям связанных нестационарных термоэлектроупругих процессов в пьезоактивных телах позволяет сделать вывод, что диссертационное исследование Савиновой Елены Владимировны актуально и соответствует современным тенденциям в области развития и обобщения на новые классы задач перспективных аналитических методов термоэлектроупругости.

Содержание диссертации. Диссертационная работа выполнена в ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» на кафедре «Строительная механика, инженерная геология,

Согласован и ознакомлен.

16.09.2025г.



фундаменты». Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 223 наименований, 3 приложений. Работа изложена на 174 страницах, содержит 86 иллюстраций, 1 таблицу.

Во введении обосновывается актуальность избранной темы и подтверждается её научная и практическая значимость, формулируются цель и конкретные задачи исследования, которые определяются в соответствии с поставленной проблематикой и методологическими подходами.

Первая глава содержит всесторонний обзор современных и зарубежных научных работ и посвящена фундаментальным вопросам упругости, термоупругости и термоэлектроупругости. В этой главе обосновывается необходимость разработки новых аналитических моделей, которые смогли бы учитывать взаимосвязь нестационарных термоэлектроупругих полей в сплошных круглых пластинах, изготовленных из пьезокерамических материалов. Проводится анализ возможностей применения специализированных программных комплексов для решения прикладных задач, связанных с элементами из пьезокерамики. Рассмотрены современные исследования в области термоупругости и термоэлектроупругости элементов различных геометрических форм, проанализированы возможности моделирования термоупругих систем и определение их напряженно-деформированного состояния. Таким образом, первая глава диссертации закладывает теоретическую основу для проведенных исследований, обеспечивая глубокое понимание существующих подходов и выявление перспективных направлений для дальнейшего развития данной научной области.

Во второй главе диссертационного исследования автором разработан алгоритм для решения динамической задачи термоэлектроупругости. Этот алгоритм создан с целью анализа поведения круглой сплошной однослойной пластины из пьезокерамики в условиях осевой симметрии. В качестве действующих нагрузок принималось температурное воздействие в заданном диапазоне величин. Было принято, что пластина имеет жёсткое закрепление контура, при этом на верхней поверхности пластины задано граничное условия теплопроводности 1-го рода, что отражено в математической постановке задачи.

Решение задачи разбито на несколько этапов. На первом этапе автор использовал ранее разработанное решение для определения температурного поля в элементе. На втором этапе было проведено исследование задачи электроупругости при изменяющемся температурном поле. Для решения задачи применён известный математический метод разделения переменных, который реализован для двух пространственных переменных. По итогам

решения задачи сделан вывод о необходимости учёта инерционных характеристик только для очень тонких пластин, приведены в сравнительной форме численные результаты решения для пластин из различных по характеристикам пьезокерамических составов.

В третьей главе диссертационного исследования решается задача, в которой закрепление сплошной круглой пластины из пьезокерамики остаётся как в предыдущей второй главе, жёстким. На нижней поверхности пластины граничными условиями задаётся конвективный теплообмен с окружающей средой. Задача формулируется без учёта инерционных характеристик с учетом результатов второй главы. Осесимметричная задача решается в связанной постановке методом разделения переменных с применением биортогонального конечного интегрального преобразования по аксиальной координате. Численные результаты задачи представлены для однослойных сплошных пластин, изготовленных из различных пьезокерамических составов. В ходе анализа численных результатов определяется наиболее оптимальный радиус разделения электродного покрытия на верхней поверхности, благодаря чему на поверхности пластины с жёстким закреплением становится возможным фиксировать больший электрический потенциал.

В четвертой главе приведено решение связанной нестационарной осесимметричной задачи термоэлектроупругости для пластины из пьезокерамики. Исследуется сплошная круглая пластина с шарнирным закреплением цилиндрической поверхности. Температурная нагрузка действует на верхнюю лицевую и на цилиндрическую поверхности. Методика решения задачи аналогична методике, применённой в третьей главе; однако, результаты численного анализа демонстрируют несколько иные значения. В процессе численного моделирования не разделяется верхняя поверхность электродного покрытия, поскольку при шарнирном, менее жестком, закреплении наблюдается другая схема деформирования пластины. Это приводит к тому, что электрический потенциал на поверхности принимает более высокие значения.

В пятой главе исследуется трёхслойная сплошная круглая пластина. Средний слой принят из пьезокерамики. Решается связанная нестационарная осесимметричная задача термоэлектроупругости пластины при шарнирном закреплении. Методика решения аналогична методике, применённой в третьей главе диссертации, но решение выполняется последовательно для различных сред многослойной пластины. Представлены результаты вычислительных экспериментов, в ходе которых рассматривались разные толщины слоёв трёхслойной пластины и анализировались полученные

результаты для определения оптимальных толщин слоёв элемента в зависимости от величины и скорости изменения внешнего температурного воздействия.

В заключении представлены сформулированные выводы и результаты, выносимые на защиту.

В завершении диссертации представлен список использованных источников и приложения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в построении новых точных аналитических замкнутых решений для электроупругих полей нестационарных осесимметричных связанных термоэлектроупругих задач для круглых однослойных и многослойных пьезокерамических пластин при граничных условиях теплопроводности 1-го, 3-го рода и различных случаях закрепления внешней цилиндрической границы (без учёта инерционных сил) с учетом связанностей и комплексного взаимодействия температурных, деформационных и электрических полей.

Практическая значимость. Разработанные методики и полученные аналитические решения рассматриваемых задач обеспечивают детальное описание особенностей функционирования пьезоэлектрических пластин при нестационарном температурном нагружении и различных условиях закрепления внешнего кругового контура и могут быть использованы для выбора и оптимизации конструктивных параметров пьезоэлектрических элементов при проектировании преобразователей различного назначения.

Апробация работы, публикации. В процессе реализации диссертационного исследования были подготовлены и опубликованы научные работы, что свидетельствует о высоком уровне проработанности и значимости полученных результатов. В общей сложности опубликовано 13 научных статей, из которых 4 размещены в рецензируемых журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Российской Федерации для публикации результатов исследований, направленных на соискание учёной степени кандидата наук. Данный факт подтверждает соответствие уровня проведённого исследования академическим требованиям.

Материалы диссертационного исследования были представлены и обсуждены на различных научных семинарах и конференциях, включая международные.

Соответствие работы требованиям, предъявляемым к диссертации и паспорту специальности. Диссертация Савиновой Елены Владимировны по теме и содержанию соответствует паспорту научной специальности 1.1.8. «Механика деформируемого твёрдого тела» по следующим направлениям исследований паспорта: 1. Законы деформирования, повреждения и разрушения материалов, в том числе природных, искусственных и вновь создаваемых; 3. Задачи теории упругости, теории пластичности, теории вязкоупругости; 8. Динамика деформируемого твёрдого тела. Теория волновых процессов в средах различной структуры; 11. Математическое моделирование поведения дискретных и континуальных деформируемых сред при механических, тепловых, электромагнитных, химических, гравитационных, радиационных и прочих воздействиях; 12. Вычислительная механика деформируемого твёрдого тела.

Аннотация в полной мере соответствует содержанию диссертации, достаточно полно отражает ее содержание.

Замечания и рекомендации по диссертационной работе:

- 1) Начиная с главы 2 (см. стр.35) и далее после формул не приводятся никаких пояснения используемых в них величин (что затрудняет понимание изложенного материала), при этом лишь на стр. 36 отмечается, что «Список условных обозначений, принятых в диссертационной работе, приведён на стр.131».
- 2) Пояснить равенство $\left(\frac{\Theta^*}{T} = 1\right)$ на стр.36 с учетом $\left(\Theta^* = T - T_0\right)$ на стр.133. Правильно: $\frac{\Theta^*}{T_0} \rightarrow 0$? с учетом, что «...отношение приращения температуры к текущей температуре много меньше единицы» (см. стр.36).
- 3) На стр.37 в разделе «Постановка исследуемой задачи» в граничных условиях не учтено условие «...в вертикальной плоскости зафиксирована её (т.е. цилиндрической поверхности пластины) нижняя часть...», лишь на стр.38 отмечается, что « вводится вспомогательная

функция $W_1(r)$ (2.22) для обеспечения закрепления пластины от перемещений в вертикальной плоскости при $r = 1$ ».

- 4) Под аксиальной поляризацией материала понимается поляризация по оси z , т.е. по толщине пластины?
- 5) Почему для трансверсально-изотропной керамики используется лишь один коэффициент линейного теплового (температурного) расширения (см.табл.2.1 стр. 51) ?
- 6) При использовании процедуры приведения неоднородных граничных условий к однородным, стандартизирующие функции определялись из условия упрощения правых частей соответствующих дифференциальных уравнений; прошу пояснить преимущества этого подхода перед другими известными подходами для решения таких задач.
- 7) В рассматриваемой многослойной конструкции для повышения ее прочностных характеристик используется металлический слой из стали; чем обусловлен выбор именно этого материала?
- 8) 3. В работе в качестве внешнего теплового воздействия использовалось только нестационарное изменение температуры на поверхности тела; возможно ли обобщение полученных решений на случай нестационарных граничных условий 2-го и 3-го родов?

В работе замечены опечатки, в частности:

- 1) используется слитное написание словосочетания «жёсткозакреплённого» элемента», правильно: жёстко закреплённого элемента.
- 2) на стр.38 написано «Равенства (2.6) удовлетворяют следующие условия:.....»
- 3) на стр.38 лишние запятые в предложении «При этом для определения, индуцируемого в процессе деформирования, потенциала...».

Сделанные замечания носят уточняющий характер и не оказывают влияния на общую положительную оценку диссертационного исследования.

Закключение.

Основные положения, выносимые на защиту, хорошо структурированы и аргументированы. Личный вклад автора диссертации Савиновой Е.В. заключается в получении новых точных аналитических замкнутых решений для электроупругих полей нестационарных осесимметричных связанных термоэлектроупругих задач и (на их основе) анализе численных результатов математического моделирования поведения и практических рекомендаций для разработки круглых однослойных и многослойных пьезокерамических пластин, что свидетельствует о высоком уровне профессиональных компетенций Савиновой Е.В. Анализ представленных в работе результатов исследований позволяет сделать вывод о их новизне, высокой достоверности и обоснованности.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата наук Савиновой Елены Владимировны является научно-квалификационной работой, которая полностью соответствует критериям актуальности, научной новизны и практической значимости, установленным в «Положение о присуждении учёных степеней», утверждённом Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, а ее автор Савинова Е.В. заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела.

Я, Паньков Андрей Анатольевич, даю согласие на размещение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя.

Официальной оппонент:

Паньков Андрей Анатольевич, Доктор физико-математических наук (01.02.04 Механика деформируемого твердого тела), доцент, профессор кафедры «Механика композиционных материалов и конструкций», федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», 614990, Пермский край, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29; тел.: +7(958)1422326, e-mail: a_a_pankov@mail.ru.

Паньков Андрей Анатольевич

«02» 09 2025 г.

Подпись *Паньков А.А.*

ЗАВЕРЯЮ
Учёный секретарь
Учёного совета ПНИГУ
В.И. Макаревич

«02» 09 2025 г.

