

## ОТЗЫВ

официального оппонента о диссертации Кусаевой Жанслу Маратовны  
“Исследование связанных нестационарных термоупругих полей в  
однослойных и многослойных круглых пластинах”,  
представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук  
по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела.

**Целью диссертационной работы** является развитие нового теоретического подхода по решению проблемы расчета круглых сплошных жестко закрепленных упругих пластин с учетом связанности термоупругих полей в случае действия внешней нестационарной осесимметричной температурной нагрузки, а также проведение качественного и количественного анализа термоупругих процессов в исследуемых системах.

**Тема диссертации является, безусловно, актуальной.** Развитие современных технологий ориентировано на уменьшение характерных размеров отдельных элементов системных устройств и увеличение плотности их организации в структуре, например, микроэлектронной или микроэлектромеханической. В некотором смысле технологии приближаются к живым организмам, которые тоже представляют собой системные устройства, элементы которых – клетки; они, в свою очередь, представляют системные устройства на более мелком масштабе и т.д. Переход к микросистемам требует пересмотра инженерных методов моделирования, многие из которых, наследуя принципы классической физики 19 века, все еще апеллируют к привычным для нас масштабам. Таковой является классическая термоупругость Дюамеля и Неймана. Развитие её положений связано с пересмотром основ термодинамики необратимых процессов, привлечением соображений из атомной физики и квантовой механики. Вместе с тем, непосредственный учет всех этих довольно громоздких теорий привел бы к настолько усложненным моделям, что их невозможно было бы использовать в инженерной практике. Спасает, как всегда, золотая середина,

в которой формальная методология остается привычной для классической континуальной физики, а полевые величины определяются так, чтобы учесть эффекты более глубоких, первичных теорий (которые сейчас принято называть первыми принципами). В этом направлении развиваются обобщенные модели термоупругости, такие, как модели Грина-Нахди, Лорда и Шульмана и пр. Учет полной термоупругой связанности, чему и посвящена диссертационная работа, тоже апеллирует к микромасштабным эффектам. В этой связи полагаю, что тематика работы актуальна, а её результаты и их дальнейшее развитие могут обладать высокой практической значимостью.

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и трех приложений общим объёмом 128 страниц машинописного текста, содержит 60 рисунков, 2 таблицы; список литературы включает 171 источник.

**Наиболее существенные новые результаты**, полученные автором в диссертации, состоят в следующем:

1. Построены **новые** решения связанной задачи термоупругости в замкнутой форме.
2. Предложены **новые** инженерные методики расчета термоупругих многослойных пластин.
3. Осуществлена **экспериментальная** верификация используемой модели и предлагаемого представления решения.
4. Сформулированы **практические рекомендации** для выбора соотношений геометрических размеров и физико-механических свойств материала многослойных элементов нефтедобывающих конструкций, которые были использованы при их проектировании.

Диссертационная работа написана ясно и лаконично, приведено большое количество результатов вычислительного моделирования, что, несомненно, следует отнести к ее достоинствам. Автор работы показал

высокую математическую квалификацию и умение довести сложные вычисления до практически важных результатов.

**Достоверность результатов** Кусаевой Жанслу. Маратовны подтверждается математической и физической корректностью разработанных моделей, использованием апробированных математических методов построения решений соответствующих краевых задач, соответствием найденных решений с физическим смыслом исследуемых процессов, согласованностью теоретических результатов с экспериментом.

**Практическая значимость.** Разработанные алгоритмы расчета применяются в инженерных расчетах, выполняемых проектным отделом ООО «НИПИ НГ «Петон», что подтверждается актом внедрения результатов диссертационной работы. Результаты работы используются в учебном процессе при подготовке магистрантов СамГТУ.

**По диссертации имеются следующие замечания.**

1. В тексте работы указывается, что *“сложность построения аналитических решений заключается в исследовании несамосопряженной дифференциальной системы связанных уравнений теплопроводности и движения”*. Это утверждение математически некорректно, так как свойством сопряженности обладают дифференциальные операторы, которые действуют в функциональном пространстве и характеризуются как дифференциальными выражениями, так и областью определения, задаваемой, например, краевыми условиями. Что касается уравнений, то они могут быть симметричными или несимметричными. Здесь, на мой взгляд, имеется не только терминологическая погрешность, но и пропуск в логической цепи рассуждений. Без характеристики функционального метрического пространства, конкретной формы метрики невозможно судить о

том, самосопряжен оператор или нет. К сожалению, эти вопросы не поясняются в тексте диссертации.

2. С первым замечанием связано второе. Прodelав недостающие выкладки (или сославшись на соответствующую литературу) можно убедиться, в том, что дифференциальные операторы связанной термоупругости (в гильбертовом пространстве с евклидовой метрикой) действительно являются несамосопряженными. В этом случае их собственные значения не ограничены действительными числами и могут (а, согласно многочисленным исследованиям, должны!) быть комплекснозначными. Более того, комплексность собственных значений отражает физический смысл связанности как источника диссипативных факторов. К сожалению, эти вопросы не обсуждаются в тексте работы, а собственные значения операторов термоупругости скрыты в последовательности параметров интегральных преобразований. Количество вычисленных параметров и их значения не указаны. Можно лишь косвенно оценить их число по программе, приведенной в приложении 3, где указаны шесть приближенных значений трансцендентных чисел. В этой связи остается открытым вопрос о погрешности, вносимой частичными суммами спектральных разложений решений, порядок которых не может превышать число вычисленных спектральных параметров. Поскольку вычисление последних без пропусков представляет собой нетривиальную вычислительную проблему, то этот вопрос является важным для приложений развиваемой в работе методики. К сожалению, ему уделено мало внимания.
3. Для удовлетворения краевого условия на цилиндрической части границы используется вспомогательная достаточно грубая аппроксимация распределения касательных напряжений. Поскольку

эта аппроксимация, фактически, представляет лишь первый член разложения, возникает вопрос об оценке погрешности, вносимой таким образом в решение. Имеет ли смысл учитывать старшие члены спектральных разложений, если достигаемая точность представлений решений будет ограничена этой аппроксимацией? Для решения, которое претендует на аналитическое, требуются пояснения и оценки.

4. Результаты вычислительного моделирования, на мой взгляд, сильно переоценивают влияние эффекта полной термоупругой связанности. Этот эффект имеет характерный масштаб, который оценивается микронами. Такая оценка означает, что ощутимое изменение поля температур, вызванное переменной дилатацией упругой среды, будет возникать либо в телах микронных масштабов, либо при высокоскоростных импульсных воздействиях, длительность которых оказывается в тех же микронных масштабах. В этой связи уравнения связанной термоупругости, в основном, используются при анализе устройств микросистемной техники, либо при исследовании быстропротекающих тепловых воздействий, например, лазерных. В работе в качестве примеров рассматриваются тела и воздействия совсем других масштабов (с характерным размером порядка метра и длительностью порядка 50 секунд), для которых эффекты полной связанности, насколько я могу судить, должны быть очень слабыми. Конечно, качественно все эффекты, описанные в работе, не вызывают сомнения, однако их количественная оценка, возможно, требует уточнения. Могу предположить, что подобная переоценка может быть связана с вычислительными погрешностями, вызванными использованием малого числа слагаемых в частичных суммах (см. замечание 3).

5. Согласно графикам, представленным на стр. 101, учет скорости дилатации в уравнении теплопроводности вначале приводит к более быстрому нагреву, а через некоторое время к более медленному (пунктирные и сплошные графики пересекаются). Хотелось бы увидеть пояснение физических причин этого феномена.
6. В экспериментальной части работы неясно, каким образом с помощью нагревательной плитки и металлического конуса удается создать заданное изменение температуры (а не теплового потока!) на одной из лицевых поверхностей пластины. Могу лишь предположить, что для этого используется довольно сложная программа изменения во времени мощности нагревателя, которая должна определяться тепловым расчетом всей системы. Было бы уместно описать экспериментальную методику более детально.
7. Имеются некоторые замечания по оформлению работы. В обзорной части работы много внимания уделено обобщенным моделям теплопроводности, которые никакого отношения к исследованию не имеют (например, модель Грина-Нахди используется для объяснения эффектов второго звука в жидком гелии). Это дает избыточные надежды читателю, которые затем не сбываются. Кроме того, хронологическая последовательность пионерных исследований искажена, например, работа В. Новацкого 1970 года не является *“первой работой по связанной теории термоупругости”*, так как уравнения были получены почти столетием раньше, и к современной форме приведены в работе М.А. Био в 1956 году, парадокс бесконечной скорости распространения теплового сигнала обсуждался еще Дж. К. Максвеллом, а одно из первых замкнутых решений, количественно иллюстрирующее связность, было получено В.И. Данилевской в 1952 г. Почему-то забыли

отечественную школу А.В. Лыкова. Не совсем ясно, с какой целью дан обзор метода конечных элементов, к тому же с совершенно неверным заключением: *“решение нестационарных задач с помощью МКЭ представляет собой отдельную математическую проблему. Кроме того, данный численный подход не в состоянии точно описать связанность термомеханических полей”*. Хотелось бы отметить, что эта проблема давно решена и реализована в широко используемых вычислительных системах (например, в Comsol 5.6). Имеются досадные (но исправимые) неточности в формулах, которые осложняют воспроизведение результатов. Например, в соотношении для *“тепловой нагрузки”* (с. 63) должна присутствовать избыточная, а не абсолютная температура.

Большая работа всегда вызывает много вопросов. Тем она и интересна. Приведенные выше замечания следует рассматривать как пожелания для дальнейшей научной деятельности. Они не снижают положительной оценки диссертации. Основное содержание диссертации опубликовано, в том числе в журналах из Перечня ВАК РФ. Диссертация прошла достаточную апробацию, докладывалась на различных семинарах и конференциях. Автореферат правильно и полно отражает содержание работы. Диссертационная работа соответствует паспорту специальности 1.1.8. Механика деформируемого твердого тела, область исследований

- 4. Механика композиционных и интеллектуальных материалов и конструкций.
- 5. Теория упругости, пластичности и ползучести.
- 7. Постановка и решение краевых задач для тел различной конфигурации и структуры при механических, электромагнитных, радиационных, тепловых и прочих воздействиях, в том числе применительно к объектам новой техники.

Считаю, что диссертация Кусаевой Жанслу Маратовны “Исследование связанных нестационарных термоупругих полей в однослойных и многослойных круглых пластинах” представляет собой научное исследование, в котором решена научная проблема, имеющая теоретическое и прикладное значение.

Диссертационная работа соответствует требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а её автор Кусаева Жанслу Маратовна заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела.

Ведущий научный сотрудник  
Института проблем механики  
им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
доктор физико-математических наук,  
(01.02.04, механика деформируемого твёрдого тела)  
доцент

 Лычев Сергей Александрович

119526, г. Москва, пр. Вернадского 101,  
Тел.: +7 (495) 434 00 17, E-mail: lychevsa@mail.ru

Подпись С.А. Лычёва удостоверяю

*Ученый секретарь ЦИРМех РАН*



*Котлов М.А.*  
2022