

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу

Евдулова Олега Викторовича

**«Разработка устройств и систем для охлаждения на основе
сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии»,**

представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.04.03 – машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения.

На оппонирование представлены: диссертация общим объемом 295 страниц, включающая введение, шесть глав, заключение; список литературы, содержащий 228 источника; два приложения на 35 страницах и автореферат диссертации на 32 страницах.

Актуальность темы диссертационной работы.

Актуальность работы обусловлена широчайшим внедрением термоэлектрических преобразователей энергии, чаще называемых термоэлектрические модули охлаждения Пельтье, в самых различных областях хозяйственной деятельности человека. Сегодня наибольшее распространение термоэлектрические преобразователи энергии нашли в различных областях приборостроения, вычислительной техники, в военной, ракетно-космической, авиационной, медицинской и бытовой технике. Основное назначение этих устройств заключается в нагреве и/или охлаждении и термостабилизации объекта воздействия. Термоэлектрические преобразователи энергии широко используются в системах кондиционирования различного назначения и исполнения и в системах управляемого изменения температуры. Трудно найти ту область деятельности человека, в которой они не применяются или не могли бы применяться. В связи с этим в обществе есть высокая потребность в работах, целью которых является выполнение исследований рабочих процессов, и в

получении новых знаний как о самих термоэлектрических преобразователях энергии, так и об устройствах, работающих на их основе. К таким работам относится и диссертация О.В. Евдулова.

Очень активно термоэлектрические преобразователи сегодня применяются в биомедицинской технике. К таким устройствам относятся прецизионные программируемые термостаты для проведения полимеразной цепной реакции (амплификаторы ДНК), которые постоянно разрабатываются и производятся в большом количестве в промышленно развитых странах. Задачей данных устройств является управляемое изменение температуры объекта, в котором размещены микропробирки с исследуемым материалом, в диапазоне от 300 до 373 К в многократно повторяющемся циклическом режиме. При этом необходимо обеспечить скорость изменения температуры объекта не ниже 3 градуса/с. Уже известны амплификаторы ДНК со скоростью 8 ... 10 градусов в секунду. Так как одновременно исследование проводится в десятках микропробирок (или ячеек планшета, емкость которого может быть 96 или 192 ячейки), то необходимо при этом обеспечить и очень высокую стабильность температурного поля ($\pm 0,1$ К) по объекту теплового воздействия. Аналогичные задачи ставятся и перед разработчиками радиоэлектронного и оптико-механического оборудования специального назначения. Безусловно, что прежде всего широкое применение термоэлектрических преобразователей основано на их базовых преимуществах: малые габариты, отсутствие механических (подвижных) узлов, легкостью в управлении, высокой надежностью и стабильностью основных характеристик. Но при этом нельзя забывать о том, что как и любые устройства, термоэлектрические преобразователи, наряду с преимуществами обладают и недостатками, ограничивающими возможности их применения. Прежде всего, это высокие токи потребления (до 100 А и выше), низкий холодильный коэффициент, высокий температурный градиент. Особенно это относится к современным низкопрофильным элементам. Последнее приводит к возникновению тепловых напряжений в

слоях структуры термоэлектрических преобразователей, что наиболее сильно проявляется в переходных режимах работы и при максимальных перепадах температур на холодном и горячем спаях ($\Delta T > 65 \dots 70\text{K}$). Решение проблемы повышения надежности термоэлектрических преобразователей достигается путем разработки новых технологий производства и применения новых материалов. О.В. Евдулов предлагает теоретический метод исследования тепловых напряжений, что в совокупности с технологическими приемами позволят создавать более надежные устройства.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций.

Достоверность и обоснованность результатов теоретических исследований подтверждается успешными результатами внедрения созданных на основе выполненных исследований изделий различного назначения. В диссертации используется современный математический аппарат исследований. Предлагаемые методы исследований и полученные технические решения апробированы на практике. Апробация результатов работы заключается, в том числе, и в представлении ее на многочисленных Российских и международных профессиональных семинарах и конференциях. Устройства, созданные с применением результатов данной диссертационной работы, многократно выставлялись на Российских и зарубежных выставках и удостоивались многочисленных наград.

Научная новизна полученных результатов.

В рамках решения поставленной научно-технической проблемы следует отметить основные новые, на мой взгляд, результаты:

– Разработан новый метод создания термоэлектрических охлаждающих аппаратов, заключающийся в использовании ТЭБ слоистой конструкции, в которой за счет специального исполнения значительно

снижены механические напряжения, являющиеся следствием теплового расширения (сжатия) материалов.

– Созданы математические модели, описывающие работу слоистых ТЭБ и систем на их основе. Разработана математическая модель слоистого ТЭ, построенная на основе решения двумерной нестационарной задачи теплопроводности и термоупругости для многослойной системы сложной конфигурации, учитывающая тепловое расширение и сжатие материалов. Получены зависимости, позволяющие определить термомеханические напряжения и деформации в слоистых ТЭ и осуществить их сравнение с характеристиками ТЭ классической П-образной конструкции. Показано, что слоистое исполнение ТЭ в значительной мере снижает величину термомеханических напряжений, возникающих в ТЭБ.

– Предложен метод теплоотвода от элементов РЭА работающих в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, состоящий в совместном использовании плавящихся рабочих веществ и сильноточных ТЭБ, дающий возможность повысить продолжительность цикла работы радиоэлектронного компонента за счет сокращения времени затвердевания рабочего агента. Создана математическая модель для расчета температурного режима работы элементов РЭА, подвергающихся повторно-кратковременным тепловым нагрузкам, при использовании разработанной системы теплоотвода.

– Разработан новый тип системы обеспечения температурного режима радиоэлектронных приборов, выполненных в виде электронных плат. Для организации эффективного отвода теплоты от таких приборов использована схема неравномерного охлаждения, реализованная на основе совместного использования плавящихся рабочих веществ и ТЭБ. Создана математическая модель, описывающая работу системы теплоотвода.

– Разработана ТЭС для локального теплового воздействия на биологически активные точки человека, позволяющая проводить адаптивную регулировку физических параметров воздействия в соответствии с

состоянием биологического объекта и обеспечивающая необходимую точность и надежность режимов работы.

– Рассмотрена ТЭС, позволяющая осуществлять тепловое действие на поверхность тела человека в лечебных и профилактических целях.

– Предложена и исследована ТЭС для внутрисполостного теплового воздействия.

– Результаты натуральных испытаний охлаждающих ТЭС подтвердили достаточную точность разработанных математических моделей и результатов теоретических исследований. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных не превысило 10 % на всем диапазоне измерений.

– На основе проведенных исследований разработаны новые конструкции слоистых ТЭБ, ТЭУ для обеспечения температурных режимов работы РЭА и ее элементов, а также медицинского назначения, которые могут найти применение в медицине, радиоэлектронике, приборостроении, и других отраслях промышленности. Ряд ТЭУ внедрен в производство, а также образовательный процесс высших учебных заведений, что подтверждено соответствующими актами.

Практическая значимость результатов работы.

Результаты диссертации внедрены в промышленности, и как это следует из актов внедрения, позволили улучшить технические характеристики оборудования и получить экономический эффект. Устройства медицинского назначения, созданные с использованием диссертационной работы, прошли клиническую апробацию. Результаты диссертационной работы внедрены в учебный процесс ФБГОУ ВО «Дагестанский государственный технический университет», ФБГОУ ВО «Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика Миллионщикова М.Д». Все это подтверждено актами внедрения (Приложение 2). Практическая значимость

проведенных работ также подтверждается включением их в федеральные научно-технические программы.

Совокупность результатов исследований, полученных в диссертационной работе, дает возможность использовать их в качестве научной основы при проектировании охлаждающих ТЭС и приборов для различных областей техники.

Соответствие содержания диссертации автореферату и опубликованным работам.

По теме представленной диссертации автором опубликовано 90 работ, в том числе, две монографии, 8 статей в журналах, входящих в базу данных Scopus, 20 статей в ведущих рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 34 патента на изобретение РФ. Содержание опубликованных материалов и автореферата отражает содержание диссертационной работы и полученные в ней результаты.

Соответствие темы диссертации заявленной научной специальности.

Тематика исследований в диссертационной работе соответствует паспорту специальности 05.04.03 - машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, в частности п. 1 - изучение общих свойств и принципов функционирования машин и аппаратов холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения, разработка научно-методических основ создания систем установок и агрегатов и рабочих тел с планируемыми свойствами.

Общая характеристика работы.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проанализирована степень разработанности темы исследований,

сформулированы цели и задачи диссертационной работы. Сформулирована научная новизна, выделены пять положений, которые выносятся на защиту, отмечаются практическая и теоретическая ценность полученных результатов, приводится информация об апробации данной работы.

Глава 1. Современное состояние в области разработки и исследования охлаждающих устройств на базе термоэлектрических преобразователей энергии. Глава включает в себя такие вопросы как оценка состояния и перспективы развития термоэлектрического приборостроения, приводятся сведения о применении термоэлектрических преобразователей в приборах и устройствах различного применения. Выполнен достаточно обширный обзор методов исследования термоэлектрических преобразователей энергии и устройств на их основе. Дается оценка перспективы использования сильноточных термоэлектрических батарей в системах охлаждения. Подводя итоги обзора состояния в области разработки и исследования охлаждающих устройств на базе термоэлектрических преобразователей энергии, автор формулирует задачи исследования. Необходимо отметить достаточно качественную обработку материалов литературного обзора, но в тоже время есть и замечания по данной главе.

Глава 2. Моделирование процессов теплопередачи и термоупругости для единичного слоистого термоэлемента. В главе представлена математическая модель теплового состояния «единичного» элемента термоэлектрического преобразователя в трехмерной постановке. Автор обосновывает упрощение математической модели и переходит к двумерной постановке решения поставленной задачи. С помощью данной математической модели выполняется расчет температурного поля термоэлемента. Так как математическая модель представляет собой систему дифференциальных уравнений в частных производных и решение ее затруднено, то автор использует численное решение на основе метода конечных элементов. Решение задачи позволило получить достаточно интересные результаты по распределению температурного поля и теплового

потока в термоэлементе. Выполнен расчет и получены распределение температуры по высоте термоэлемента в зависимости от величины тока питания в диапазоне от 80 до 140 А. Интерес данного результата расчета в том, что методами физического (натурного) эксперимента получить подобные результаты практически невозможно. А эти данные необходимы для предварительной оценки общей «тепловой картины» термоэлемента при проектировании изделия в целом. Далее автор переходит к разработке математической модели и расчету поля термомеханических напряжений в термоэлементе. Полученные данные во многом объясняют причины возможного разрушения термоэлемента. Очень интересно выполненное автором расчетное сравнение напряжений и термодформации в «слоистом» и классическом П-образном термоэлементах. Полученные данные подтверждают выводы, сделанные ранее, о преимуществе «слоистых» термоэлементов.

Глава 3. В данной главе автор рассматривает достаточно актуальные процессы, протекающие в системах охлаждения радиоэлектронной аппаратуры с применением контейнеров с плавящимся и кристаллизуемым рабочим веществом. Автор обосновывает применение в таких изделиях дополнительной охлаждающей системы, обеспечивающей эффективный отвод тепла от рабочего вещества. В качестве такого дополнительного устройства охлаждения предложены термоэлектрические устройства (ТЭУ). Для обоснованного подтверждения эффективности их применения разработаны математические расчеты и выполнены численные исследования работы охлаждающей системы. В качестве примера приводится расчет для электронной платы с размещенной на ней РЭА. Исследованы процессы теплообмена при плавлении и кристаллизации рабочих веществ. В результате выполненных расчетов автор приходит к выводу, что локальный теплоотвод с помощью охлаждающих ТЭУ более выгоден, чем равномерное охлаждение.

Глава 4. Данная глава посвящена теоретическому исследованию теплового воздействия на биологические ткани. Автором разработана

математическая модель расчета и проведено численное исследование теплового воздействия на отдельные зоны организма человека, в том числе на зоны, в которых расположены «биологически активные точки». Тепловое воздействие на отдельные зоны поверхности тела человека распространены в медицинской практике при лечении и профилактике целого ряда различных заболеваний. Кроме того, известны методики, основанные на тепловом воздействии на живую ткань для получения эффекта локальной анестезии. Данные методики применяются в тех случаях, когда медикаментозное воздействие по тем или иным причинам исключено. Получены достаточно интересные результаты, отображающие распределение температуры в системе «живая ткань-тепловой наконечник-термоэлектрическая батарея». К сожалению, автор не приводит в представленных результатах численного расчета, где проходит раздел технической системы и живой ткани. Не очень понятно на какую глубину в ткани живого организма проходит тепловое воздействие. Данные сведения были бы очень полезны не только разработчику системы, но и ее будущему потребителю – медицинскому работнику.

Глава 5. Для подтверждения адекватности разработанных математических моделей расчета тепловых процессов в исследуемых системах, в том числе и при воздействии на живые ткани организма, разработаны и изготовлены экспериментальные стенды и проведены серии экспериментальных исследований. Обработка результатов эксперимента позволила автору сделать вывод, что экспериментальные исследования подтверждают адекватность созданных в данной работе математических моделей тепловых процессов. Так для системы охлаждения элементов радиоэлектронной аппаратуры с повторно-кратковременными тепловыделениями с использованием плавящихся рабочих веществ и ТЭБ, максимальное отклонение опытных данных от расчета составляет 7 ... 10 %. Экспериментальное исследование системы неравномерного охлаждения электронных плат показало, что максимальное расхождение с результатами

расчета не превышает 10 %. Для теплового воздействия на биологически активные точки расхождение расчетных и экспериментальных данных не превышает 7 ... 8 %, а для теплового воздействия на отдельные зоны поверхности тела человека отклонение не превышает 8-9 %.

Полученные результаты экспериментальных исследований могут быть полезны разработчикам подобных систем.

Глава 6. В главе описывается разработка и создание охлаждающих приборов и систем на базе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии. Итогом выполненных автором исследований и полученных новых знаний, явилась разработка значительного числа новых решений и технических устройств на базе термоэлектрических элементов.

В заключении автор формулирует основные, полученные им научные и практические результаты диссертационной работы.

Таким образом, в диссертационной работе О.В. Евдулова даны теоретические основы, методы и алгоритмы расчета рабочих процессов, созданы экспериментальные стенды и проведены исследования и разработаны различные по назначению и исполнению современные устройства на термоэлектрических элементах.

Замечания по работе.

1. В главе 1 не подведен итог обзора методов исследования и математических моделей рабочих процессов в термоэлектрических преобразователях энергии и в устройствах на их основе.

2. Название главы 2 «Моделирование процессов теплопередачи и термоупругости для единичного слоистого термоэлемента» правильно начать со слова «**Математическое**»

3. В математической модели термоэлемента нет учета таких базовых эффектов как Пельтье, Томсона и Зеебека. Автор включил в математическую модель эффект Джоуля, как источника тепла, и описание теплопроводности по слоям элемента.

4. Стр. 55. Автор пишет: «Решение трехмерной нестационарной задачи теплопроводности для условий, соответствующих (2.1) - (2.2), вызывает определенные трудности, поэтому имеет смысл упростить математическую формулировку задачи расчета теплообмена в слоистом ТЭ». Но автор не обосновывает и не оценивает результат упрощения математической модели.

5. В главе 3 указывается: «Для охлаждения РЭА, работающей в режиме повторно-кратковременных тепловых нагрузок, перспективным является метод, основанный на использовании плавящихся тепловых аккумуляторов со стабильной температурой и высокой теплотой плавления». Но нет данных о длительности выдержки и частоте переключений. Это важно для динамического расчета теплового состояния изделия.

6. В главе 3 используется термин «затвердевание» (разделы 3.1.1, стр.78 и 3.1.2, стр.89) Процесс перехода из жидкого состояния в твердое называется кристаллизация или стеклование. Стеклование – переход аморфного вещества из жидкого в твердое состояние. Парафин, используемый в данной работе, является телом с кристаллической решеткой.

7. Решению каких задач диссертации соответствует глава 4?

8. Автор не приводит сведений по теплофизическим свойствам живой ткани, без которых выполнять тепловой расчет, приведенный в главе 4 не корректно.

9. При описании экспериментальных стендов и методики проведения исследований не приводятся сведения по техническим характеристикам средств измерения.

Отмеченные недостатки не снижают общую положительную оценку работы. Она выполнена на адекватном научном уровне.

Надеюсь, что в процессе защиты диссертации соискатель даст обоснованные ответы на поставленные вопросы и сделанные замечания.

Работа хорошо оформлена, а текст диссертации написан хорошим техническим языком. Имеющиеся небольшие недочеты не оказывают влияния на чтение и осмысление результатов. Автореферат в целом отражает основное содержание диссертационной работы.

Общее заключение

- Актуальность темы диссертации не вызывает сомнения.
- Основные научные положения и результаты, выносимые на защиту, имеют научную новизну.
- Результаты работы имеют практическую значимость.
- Выводы по результатам работы обоснованы.

Анализ материалов, представленных на оппонирование, позволяет утверждать, что диссертация Олега Викторовича Евдулова на тему: «Разработка устройств и систем для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии», соответствует паспорту специальности 05.04.03 «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения» и является самостоятельной, завершенной научно-квалификационной работой, содержащей большое количество научных и практических результатов.

В диссертационной работе Олега Викторовича Евдулова решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение: созданы новые устройства и системы для охлаждения на основе сильноточных термоэлектрических преобразователей энергии, внедрение которых вносит значительный вклад в создание новых, наукоемких технических решений. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации. Материал диссертации прошел апробацию на российских и международных конференциях и выставках, Основные научные результаты диссертации опубликованы в рецензируемых научных изданиях.

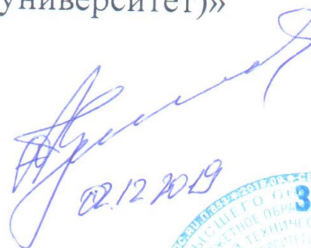
Диссертационная работа Олега Викторовича Евдулова соответствует требованиям п.9 «Положения о присуждении ученых степеней»

утвержденных постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 года № 842, предъявляемых к диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор Олег Викторович Евдулов заслуживает присуждения искомой степени по специальности 05.04.03 «Машины и аппараты, процессы холодильной и криогенной техники, систем кондиционирования и жизнеобеспечения».

Официальный оппонент:

д.т.н. (специальность 05.11.17), профессор,
профессор кафедры
«Вакуумная и компрессорная техника» (Э-5)
ФГБОУ ВО «Московский государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана
(национальный исследовательский университет)»

Чернышев Андрей Владимирович


22.12.2019



Почтовый адрес:

105005, Москва. 2-я Бауманская ул., д. 5, Телефон: +7 (499) 263-68-36

Контакты официального оппонента:

Моб. +7 916 5535752, e-mail: av-chernyshev@yandex.ru