

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Володченкова Сергея Игоревича на тему

«Моделирование процесса сопряженного теплообмена в устройствах индукционного многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Актуальность темы диссертационной работы

Эффективность баллистических установок в значительной степени зависит от того, как быстро происходит процесс генерации энергии при сгорании специальных высокоэнергетических материалов. Поэтому стадия зажигания в рассматриваемых условиях играет важнейшую роль. Задачи минимизации времени задержки зажигания в таких системах до последнего времени решаются, в основном, эмпирически – в результате выбора по результатам экспериментальных исследований как способов и устройств воспламенения, так и параметров последних. Но результаты экспериментальных исследований при высокой, как правило, их надежности не обеспечивают вариативности процесса поиска наиболее эффективных технических решений как по конструкциям устройств для зажигания высокоэнергетических материалов, так и по их основным параметрам. В основном, это обусловлено высокими затратами времени и материальных ресурсов на проведение такого рода экспериментов. В этой связи математическое моделирование комплекса взаимосвязанных физических процессов, протекающих в высокоэнергетических материалах специального назначения в условиях их импульсного индукционного нагрева, является актуальной задачей, решение которой имеет как фундаментальное, так и прикладное значение. Соответственно, тема кандидатской диссертации С.И. Володченкова, целью которой является моделирование процесса сопряженного теплообмена в устройствах многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов, безусловно, актуальна.

В дополнение к вышеизложенному есть основания отметить, что по своим цели, задачам, методам их решения, основным результатам диссертационного исследования и выводам диссертация С.И. Володченкова соответствует приоритетному направлению науки, технологий и техники в Российской Федерации «Перспективные виды вооружения, военной и специальной техники» (утвержден Указом Президента РФ № 899 от 07 июля 2011 года).

Общая характеристика диссертации.

Диссертация С.И. Володченкова состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Рукопись диссертации выполнена на 136 страницах, включая 69 рисунков и одну таблицу. Список использованных источников составляет 101 наименование.

Во введении в соответствии с современными требованиями автор обосновывает актуальность темы своего диссертационного исследования, формулирует цель и задачи диссертации, обосновывает новизну и практическую значимость полученных им результатов, формулирует выносимые на защиту положения. В этом же разделе диссертации приведено описание современного, по мнению автора, состояния исследований по высокоскоростным электротермохимическим ускорителям твердых тел с акцентом на плазмозамещающие технологии зажигания зарядов продуктами горения высокоэнергетических составов.

В первой главе диссертации приведено достаточно полное описание объекта исследования – индукционного устройства зажигания метательного заряда, а также физических и химических процессов, протекающих при его работе.

Во второй главе приведены постановка задачи индукционного нагрева короткозамкнутых тонкостенных проводников в магнитных полях частотой несколько кГц до температур плавления при характерных временах единицы миллисекунд, метод решения и результаты. Путем сравнения результатов решения задачи в рамках «электротехнического приближения» и «магнитно-диффузионного приближения» обоснована эффективность предложенного автором диссертации подхода к решению задачи индукционного нагрева.

Третья глава посвящена математическому моделированию процессов последовательного преобразования энергии в узлах индукционного устройства импульсного нагрева высокоэнергетического материала ансамблями тонкостенных цилиндрических проводников, нагреваемых вихревыми токами в переменном магнитном поле соленоида. Сформулирована краевая задача математической физики, описывающая процессы переноса тепла в проводнике и прилегающих к нему слоях высокоэнергетического материала. При использовании ряда допущений получено решение задачи теплопроводности. Разработан алгоритм решения системы интегро-дифференциальных и алгебраических уравнений методом итераций. В этой же главе приведены результаты численного анализа влияния материала проводников, количества ансамблей и их расположения в соленоиде, а также параметров внешней электрической цепи на динамику формирования температурных полей прилегающих к проводнику слоев материала.

В четвертой главе приведены результаты математического моделирования температурных полей высокоэнергетического пиротехнического покрытия в результате работы индукционного устройства. Выполнен анализ схемы индукционного устройства зажигания с тонкостенными полыми цилиндрическими проводниками, покрытыми слоем пиротехнического состава. При решении задачи принято условие идеального теплового контакта проводника с внутренней поверхностью покрытия. Проведен анализ работы двух вариантов индукционного устройства, отличающихся начальным напряжением на батарее и шагом витков соленоида. Рассчитаны температурные тренды в характерных точках покрытий группы проводников. Установлено, что коэффициент преобразования электрической энергии конденсаторной батареи в теплоту, поступающую в высокоэнергетические пиротехнические покрытия составляет 34,2% и 29,7% для проводников среднего и крайнего ансамблей, соответственно. Сделан вывод, что при рассматривавшемся режиме нагрева произойдет инициирование пиротехнического покрытия на всех проводниках. Соответственно, сделано заключение по результатам выполненных в этой главе исследований, что эффективность рассмотренного автором диссертации способа нагрева пиротехнических покрытий является достаточно высокой и стабильной.

Пятая глава посвящена анализу результатов исследования индукционного нагрева топлива и нагрева проводниками оригинальной геометрии с «шестью лепестками» - «ромашка». После решения аналогичных задач теплопроводности и анализа эффективности индукционного нагрева топлива и пиротехнического покрытия проводниками двух разных конструкций («ромашка» и ансамбль из семи цилиндрических проводников) установлено, что в достаточно типичных условиях работы индукционных устройств тепловой поток от проводника типа «ромашка» в

топливо происходит аналогичный поток от ансамбля проводников в 2,7 раза. Соответственно изменяются и температуры топлива.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования С.И. Володченкова.

Общая методология и методика исследования

Автор провел математическое моделирование комплекса физических (в том числе и теплофизических) процессов, протекающих в устройствах индукционного и многоочагового нагрева высокоэнергетических материалов с использованием достаточно простых математических моделей и методов решения соответствующих задач. Безусловным достоинством работы является то, что автор описал комплекс сложных физических процессов, начиная от генерации электрического разряда и заканчивая ростом температуры реакционноспособных материалов. Используются физические модели, в целом, адекватно описывающие процессы преобразования и переноса энергии в устройствах индукционного нагрева. Автор использовал ставший классическим аппарат теории теплопроводности, известный многие десятилетия и редко использующийся в последнее время. Получено приближенное решение уравнения теплопроводности для пластин металла и реакционноспособной среды. С целью описания процессов выделения теплоты в проводниках, являющихся по существу точечными источниками теплоты в большом массиве топлива, получены в рамках сформулированной постановки приближенные решения «электротехнической» и «магнитно-диффузионной» задач, которые в дальнейшем использовались при описании процесса тепловыделения в одиночном проводнике и в ансамбле проводников. При постановке всех задач диссертации автор использовал современные представления о физике протекающих в устройствах индукционного нагрева процессов, и методах приближенного решения сформулированных в диссертации задач.

Степень обоснованности и достоверности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации.

Достоверность результатов выполненных автором численных исследований подтверждается сравнением с результатами экспериментов.

Научная новизна полученных результатов.

С.И. Володченковым получен ряд результатов, соответствующих критерию новизны. Наиболее значимыми, по мнению оппонента, являются следующие:

1. Сформулированы математические модели устройств с дистанционной индукционной схемой многоочагового нагрева реакционноспособных сред с учетом параметров внешней электрической цепи, источника электрической энергии и генератора магнитного поля, зависимостей удельных электрических сопротивлений проводников и соленоида от температуры, условий теплообмена на границах раздела проводников и реакционноспособной среды.

2. В результате численных исследований установлена эффективность импульсного преобразования электрической энергии накопителя в теплоту, выделяющуюся в реакционноспособной среде.

3. Предложен новый вариант геометрии выделяющих тепло короткозамкнутых проводников с высокой иницирующей поверхностью и эффективной индуктивной связью с соленоидом.

4. Проведены численные оценки коэффициента преобразования электрической энергии конденсатора в тепловую при двух вариантах геометрии проводников (типа «ромашка» и полых цилиндрических).

Совокупность полученных С.И. Володченковым результатов можно квалифицировать как новое решение актуальной научной задачи, имеющей существенное значение для теории и практики преобразования электрической энергии в тепловую в технических системах и устройствах специального назначения.

Практическая значимость

Разработанный автором диссертации подход и математические модели могут быть использованы при разработке устройств многоочагового зажигания метательных зарядов в высокоскоростных ускорителях твердых тел. Следует особо отметить, что разработанный автором диссертации математический аппарат с одной стороны достаточно полно описывает физические процессы в рассматриваемом устройстве, с другой же стороны может быть использован инженерами проектных и конструкторских организаций.

Замечания по диссертации

1. Автор недостаточно обоснованно использует словосочетание «точные аналитические решения» в тексте рукописи и автореферата. Полученные им решения являются аналитическими, но квалифицировать их как точные нет оснований, т.к. при постановке всех задач диссертации и их решении использовалась группа допущений по физике процесса, которые являются причиной отклонений решений от точных в традиционном понимании этого термина.

2. Термин «идеальная теплопроводность» не является общепринятым в теории теплопереноса и его использование при описании процесса передачи теплоты от проводника в топливо при решении задач диссертации вместо словосочетания «идеальный тепловой контакт на границе раздела проводник – топливо» не обосновано.

3. В реальной практике изготовления устройств, исследуемых автором диссертации, обеспечение условий идеального теплового контакта между проводником любой геометрии и топливом, скорее всего, невозможно по целому ряду объективных причин. Наличие же воздушного зазора на этой границе толщиной даже в десятки микрон может существенно изменить интенсивность теплопередачи на этой границе. Уместными выглядели бы оценки влияния этого допущения на результаты моделирования температур в рассматриваемой автором системе «проводник – топливо».

4. Недостаточно обосновано использование автором диссертации термина «сопряженные тепловые задачи». В традиционной интерпретации сопряженными называются задачи, в которых решаются уравнения энергии для двух сред, граничащих между собой, в условиях движения газа или жидкости (одной из сред). Фактически же автор решает задачу теплопроводности для двухслойной пластины в условиях интенсивного тепловыделения в одной из них.

5. Основные задачи диссертации автор решает в декартовой системе координат. Проводники же в части задач имеют форму цилиндров, поэтому зона прогрева слоя топлива вблизи поверхности цилиндрического проводника также имеет форму полого цилиндра. При характерных толщинах этого слоя менее 1мм правомерен вопрос о влиянии «цилиндричности» слоя топлива на результаты вычисления температур топлива. Переход же от декартовой системы координат к цилиндрической в аналогичных задачах теплопроводности для областей малых размеров всегда приводит к снижению температур в адекватных по условиям теплового воздействия задачах.

Значимость для науки и практики полученных в диссертации С.И. Володченкова результатов, сформулированных положений и выводов сделанные замечания не снижают. Диссертация С.И. Володченкова является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, содержит

результаты теоретических исследований, соответствующие критерию новизны. На основании анализа содержания рукописи диссертации можно сделать вывод, что в ней приведено новое решение задачи теплопереноса, имеющей существенное значение для развития научного направления «Преобразования электрической энергии в тепловую в технических системах и устройствах специального назначения».

Автореферат диссертации полностью соответствует тексту рукописи, которая написана в доказательном стиле и хорошо иллюстрирована. По теме диссертации автором опубликовано три статьи в журналах, рекомендованных ВАК Минобрнауки для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций. Диссертация хорошо апробирована на международных и всероссийских научных и научно-практических конференциях.

Заключение о соответствии диссертации критериям.

На основании анализа содержания рукописи и автореферата диссертации С.И. Володченкова «Моделирование процесса сопряженного теплообмена в устройствах индукционного многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов» можно сделать обоснованное заключение о том, что она соответствует требованиям П.9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного Постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 (ред. от 01.10.2018), а ее автор Сергей Игоревич Володченков заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Главный научный сотрудник
Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова
Федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский
Томский политехнический университет»,
доктор физико-математических наук
(01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника),
профессор


03.02.2020

Кузнецов Гений Владимирович

Адрес: 634050, г. Томск, пр. Ленина, д.30,
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, тел.: 8 (3822) 60-63-33,
tpu@tpu.ru; <http://www.tpu.ru/>
E-mail: marisha@tpu.ru
тел.: 8(3822)60-62-48

Подпись Г.В. Кузнецова удостоверяю:

Ученый секретарь Национального
исследовательского Томского
политехнического университета




Ананьева Ольга Афанасьевна