

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Володченкова Сергея Игоревича «Моделирование процесса сопряженного теплообмена в устройствах индукционного многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Разработка методов повышения дальности метания твердых тел (снарядов) с использованием новых физических принципов представляет в настоящее время актуальную и практически важную задачу, прежде всего в интересах повышения обороноспособности страны. Хорошо известны масштабные исследования электродинамических устройств разгона тел до чрезвычайно высоких скоростей (рельсотроны). Однако для практического использования подобные системы являются сложными, дорогостоящими и в настоящее время проходящими этап технологического совершенствования.

В последнее время для увеличения дульной скорости метаемых тел и стабильности характеристик их движения большое внимание в мире уделяется поиску новых составов топлив, в том числе гелей, жидкостей, смесевых топлив и т.д. В то же время такие топлива имеют не высокую скорость горения, поэтому возникают проблемы их быстрого зажигания и, соответственно, горения.

В настоящей работе прорабатываются устройства, сочетающие использование электрической и химической энергии для обеспечения более полного сгорания топлива к моменту выстрела. Подобные системы получили название электротермохимического (ЭТХ) зажигания. В этом случае, запасенная электромагнитная энергия в виде импульса проникает в объем топлива, в котором предварительно размещены металлические элементы различной формы (тонкая проволока, цилиндр, «ромашка» и т.п.), взаимодействует с ними с образованием плазмы. При этом время зажигания

значительно сокращается, а горение существенно интенсифицируется, что приводит к росту импульса метаемых снарядов. Изучению именно этих тепловых процессов при электромагнитном нагреве элементов внутри топливной камеры уделено в работе основное внимание.

В диссертации представлен большой комплекс расчетных исследований процесса индукционного нагрева различных элементов, расположенных в топливе, последовательно, начиная с простейших, а затем и более сложных и имеющих непосредственное отношение к реальным метательным системам. Все задачи решаются в упрощенной постановке без детального анализа физико-химических процессов образования плазмы и горения топливной смеси. Основное внимание в работе было сосредоточено на этапе теплового прогрева в зависимости от теплофизических свойств топлива, магнитной индукции, а также форм и расположения нагреваемых элементов. Важно, что практически для всех рассматриваемых задач автором получены точные аналитические решения, позволяющие легко адаптировать их для решения инженерных задач.

К наиболее важным результатам, обладающим существенным элементом новизны, следует отнести слабое влияние диффузии магнитного поля при импульсном индукционном нагреве тонкостенных полых цилиндров, поэтому данным эффектом можно пренебречь. Автором установлено, что разрабатываемые электроимпульсные индукционные устройства в состоянии нагреть топливо до температур начала инициирования при характерных микросекундных временах. Сделан ряд важных для практики выводов об эффективности использования для нагрева сложных трехмерных структур из металла типа «ромашка». При этом в работе создан солидный задел как в понимании тонкостей теплофизических процессов при импульсном индукционном нагреве, так и в практическом плане при проектировании многоочаговых систем зажигания пороха в метательных устройствах.

Полученные данные представляются достоверными, поскольку разработанные модели построены на фундаментальных основах

электротехники, магнитного поля и теплофизики. Полученные решения являются аналитическими, дающими как предельные переходы, так и не противоречащими законам сохранения.

Работа большая по объему со значительным количеством иллюстративного материала и подробным выводом расчетных соотношений. Физико-математическая постановка задач формулирована ясно, граничные условия реалистичны и понятны. Написана она простым и грамотным языком, серьезных претензий по оформлению материала отсутствуют. В конце каждой главы диссертант приводит примеры расчетов конкретных схем зажигания, что также говорит в пользу достоверности и практической значимости результатов. В конце диссертации приводятся выводы по работе, отражающие существо и научную новизну полученных автором результатов.

Тем не менее, работа не лишена недостатков и основные замечания могут быть сформулированы следующим образом:

1. Представленный в Главе 1 обзор современного состояния проблемы дает общее представление о проблеме индукционно – плазменного нагрева пороховых метателей. Однако в нем весьма слабо отражен вопрос о современных подходах при решении подобных задач, недостаточно полно описаны конкретные модели проникновения электромагнитного поля в заряды и их взаимодействия с элементами, в том числе и теплофизические аспекты этой сложной проблемы.
2. Для большинства поставленных в работе задач решен первый этап процесса - импульсный нагрев проводников до температуры их плавления. Второй этап – взрыва проводников с образованием своеобразного спрея металлических частиц и их дальнейшего взаимодействия с основным топливом рассмотрен фрагментарно. Вполне понятно, что этот этап не входил в программу работ, но рассмотреть его хотя бы на качественном уровне было бы полезным, поскольку в конечном итоге речь в работе идет именно о метании тел.

3. На стр. 64 в разделе 3.2.2 речь идет об идеальной теплопроводности нагреваемого проводника. Это означает бесконечный коэффициент теплопроводности, или как?
4. В разделе 4.1. приводится описание экспериментальной установки, но сравнения с расчетными данными отсутствуют. Почему это так, осталось не ясным.
5. Не умаляя приоритета и важности точных решений, следовало бы упомянуть и о возможностях, а может быть и существующих численных решениях задачи, для которых нет принципиальных затруднений при анализе теплопереноса в сложных геометриях, в том числе и при сильных зависимостях свойств среды от температуры.
6. В обзорной части работы в подрисуночных подписях следовало бы указать литературные источники, из которых заимствованы автором результаты.

Совершенно очевидно, что сделанные замечания не в силах повлиять на общую очень высокую оценку работы, новизну ее результатов и их прикладную значимость. Работы в данном направлении сейчас активно ведутся во всем мире и настоящая диссертация представляет весомый вклад в науку и технологии об интенсификации процессов зажигания топлив в метательных устройствах.

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации. Главные достижения работы опубликованы, хотя они явно претендуют на публикации в более высоко рейтинговых изданиях.

Апробация работы представляется вполне приемлемой. Она докладывалась на ряде ведущих отечественных научных форумах.

Таким образом, представленная диссертационная работа является законченным научным исследованием теплофизических процессов, происходящих при импульсном индукционном многоочаговым нагревом и зажиганием реакционноспособных составов применительно к новым высокоэффективным метательным устройствам. Выполненная работа



удовлетворяет квалификационным требованиям, предъявляемым ВАК России к кандидатским диссертациям, в том числе соответствует требованиям п.9 “Положения о присуждении ученых степеней”, а ее автор **Володченков Сергей Игоревич** заслуживает присвоения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника.

Официальный оппонент, главный научный сотрудник  
ФГБУН Институт теплофизики  
им. С.С. Кутателадзе СО РАН,  
лаборатория термодинамики,  
Заслуженный деятель науки РФ,  
доктор технических наук, профессор  
(01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника)  
E-mail: [terekhov@itp.nsc.ru](mailto:terekhov@itp.nsc.ru), Тел. 8(383)3306736



Терехов Виктор Иванович

Я, Терехов Виктор Иванович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Володченкова Сергея Игоревича и их дальнейшую обработку.

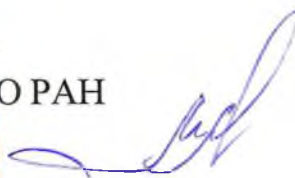


Терехов Виктор Иванович

29.01.2020 г.

Подпись В.И. Терехова заверяю:  
Ученый секретарь ФГБУН Институт  
теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН  
к.ф.-м.н.

Адрес организации:  
630090, Россия, Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 1.  
<http://www.itp.nsc.ru/>, Тел. 8(383)3309040, Факс: 8(383) 3308480.  
E-mail: [diracor@itp.nsc.ru](mailto:diracor@itp.nsc.ru)



Макаров М.С.