

СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 21 февраля 2020 года публичной защиты диссертации Володченкова Сергея Игоревича «Моделирование процесса сопряженного теплообмена в устройствах индукционного многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 18 из 26 членов диссертационного совета, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника:

- | | |
|--|----------|
| 1. Шрагер Г. Р., доктор физико-математических наук, профессор,
председатель диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 4. Архипов В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 5. Биматов В.И., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.02.05 |
| 6. Бутов В. Г., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 7. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 8. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 9. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 10. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 11. Люкшин Б. А., доктор технических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 12. Миньков Л. Л., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 13. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 14. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |
| 15. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 16. Старченко А. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 17. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 18. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |

Заседание провел председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Шрагер Геннадий Рафаилович.

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить С. И. Володченкову ученую степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,
созданного на базе федерального государственного автономного
образовательного учреждения высшего образования
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от 21.02.2020 № 420

О присуждении **Володченкову Сергею Игоревичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Моделирование процесса сопряженного теплообмена в устройствах индукционного многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 06.12.2019 (протокол заседания № 399) диссертационным советом Д 212.267.13, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Володченков Сергей Игоревич**, 1987 года рождения.

В 2009 году соискатель окончил государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет».

В 2014 году соискатель очно окончил аспирантуру федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности начальника научно-исследовательской группы отделения 71 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Диссертация выполнена на кафедре прикладной аэромеханики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Глазунов Анатолий Алексеевич**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», Научно-исследовательский институт прикладной математики и механики, директор.

Научный консультант – кандидат физико-математических наук, **Синяев Сергей Витальевич**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», лаборатория 102 Научно-исследовательского института прикладной математики и механики, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Кузнецов Гений Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова, главный научный сотрудник

Терехов Виктор Иванович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория термогазодинамики, главный научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «**Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)**», в своем положительном отзыве, подписанном **Ягодниковым Дмитрием Алексеевичем** (доктор технических наук, профессор,

кафедра «Ракетные двигатели», заведующий кафедрой), указала, что развитие методов и средств моделирования и проектирования импульсных устройств со сложными тепло- и массообменными процессами в условиях многоступенчатого преобразования энергии является в настоящее время весьма востребованным научным направлением. С. И. Володченковым созданы новые математические модели процессов сопряженного теплообмена в устройствах электроимпульсного индукционного нагрева высокоэнергетических топлив и пиротехнических покрытий тонкостенными короткозамкнутыми проводниками различной формы; построены точные аналитические решения сопряженных тепловых задач при индукционном нагреве ансамблей короткозамкнутых цилиндрических проводников переменным магнитным полем соленоида; разработаны алгоритм и методика численно-аналитического расчета, позволяющие определять конструктивные и электротехнические параметры устройства импульсного нагрева реакционноспособных составов до температур их инициирования; исследованы особенности процесса импульсного индукционного нагрева плазмозамещающих реакционноспособных сред применительно к задачам многоочагового зажигания пороховых метательных зарядов и дополнительных зарядов высокоэнергетического топлива; определены эффективные параметры устройств многоочагового индукционного зажигания метательных зарядов при различных условиях теплообмена ТЭН с реакционноспособными средами. Результаты могут применяться при проектировании и эксплуатации различных индукционных устройств с дистанционным бесконтактным тепловым воздействием на рабочие среды для различных практических приложений.

Соискатель имеет 7 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы (в том числе в российском научном журнале, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа), в сборниках материалов международной и всероссийских научных конференций опубликовано 4 работы. Общий объем публикаций – 2,17 а.л., авторский вклад – 1,11 а.л.

В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты диссертации.

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. Синяев С. В. Математическое моделирование индукционного нагрева полых цилиндрических проводников в магнитном поле соленоида / С. В. Синяев, **С. И. Володченков**, И. С. Толтаева // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2013. – Т. 56, № 9/3. – С. 200–203. – 0,25 / 0,1 а.л.

2. Синяев С. В. Импульсный индукционный нагрев полых тонкостенных цилиндрических проводников в магнитном поле соленоида в режимах многоочагового зажигания метательных зарядов / С. В. Синяев, **С. И. Володченков** // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2013. – № 6 (26). – С. 96–105. – 0,4 / 0,2 а.л.

3. **Володченков С. И.** Импульсный нагрев среды ансамблями полых цилиндрических проводников, индукционно нагреваемых магнитным полем соленоида / С. И. Володченков, С. В. Синяев // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 46. – С. 50–63. – DOI: 10.17223/19988621/46/7. – 0,52 / 0,35 а.л.

Web of Science: Sinyaev S. V. Pulse heating of a medium by assemblies of hollow cylindrical conductors inductively heated in the magnetic field of a solenoid / S. V. Sinyaev, **S. I. Volodchenkov** // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta-Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2017. – № 46. – P. 50–63.

На автореферат поступило 7 положительных отзывов. Отзывы представили: 1. **С. С. Макаров**, д-р техн. наук, старший научный сотрудник лаборатории физико-химической механики Института механики Удмуртского федерального исследовательского центра УрО РАН (г. Ижевск), с замечаниями: на с. 14 приведены значения теплофизических свойств топлива, а на странице 19 – теплофизические свойства пиротехнического покрытия, но непонятно, при какой температуре принимаются эти значения, и были ли проведены оценки влияния принятых значений

теплофизических свойств веществ на время прогрева и изменения величины теплового потока; на с. 15 указывается, что теплообмен проводников с топливом осуществляется по закону Ньютона при постоянном значении коэффициента теплообмена H , но не приведена расчетная зависимость по его определению, а также обоснование его числового значения; в тексте автореферата на с. 20 приводится: «Внешний радиус «ромашки» близок по величине внутреннему радиусу соленоида, что обеспечивает его более эффективное потокосцепление с соленоидом», но не указано, проведена ли численная оценка этой эффективности, и какова разница между суммарным магнитным потоком рассматриваемых вариантов на рисунке 16.

2. **А. Н. Богданов**, канд. физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник 112 Лаборатории газодинамики взрыва и реагирующих систем Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, *с замечанием* о том, что местами изложение страдает неточными / неполными формулировками.

3. **И. Г. Русяк**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Математическое обеспечение информационных систем» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова, *с замечаниями*: не выделены четко объект и предмет исследования; непонятен термин «точные аналитические решения»; не все обозначения описаны, что усложняет понимание текста.

4. **Е. В. Беспала**, канд. физ.-мат. наук, начальник отдела научно-исследовательской деятельности и технического сопровождения вывода из эксплуатации производства вывода из эксплуатации ЯРОО Горно-химического комбината (г. Железногорск Красноярского края), *с замечаниями*: следует аргументировано обосновать выбор конденсаторов в качестве источников тока, а так же оценить влияние их замены на более совершенные элементы питания; на с. 6 в разделе «Методология и методы исследования» указано, что проведено сопоставление результатов расчета с результатами модельного эксперимента, однако результаты эксперимента отсутствуют, а в заключении не представлены результаты сопоставления; в уравнении (2) (квадратурное решение для полупространства) под знаком интеграла указано две переменных, отражающих ход времени (τ и t), однако не объяснен физический смысл данных величин для описываемого процесса, что затрудняет интерпретацию графиков на рисунке 11;

на с. 17 утверждение «Проводники из магния нагреваются более эффективно и на несколько большую глубину прогревают примыкающие слои топлива (рисунок 12 б)» является тривиальным, этот факт вытекает из физических свойств материалов; желательно в дальнейшем представить результаты исследования в зарубежных журналах с целью их оценки мировым научным сообществом; с целью повышения эффективности использования баллистических устройств целесообразно рассмотреть такую конструкцию, в которой реакционноспособная среда и проводники («ромашка» и ансамбль) были бы разъединены (дистанцированы) с целью их многократного использования.

5. **Ю. Л. Ермакович**, канд. техн. наук, начальник отдела внутренних и внешних воздействий АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «Атомпроект» (г. Санкт-Петербург), и **К. А. Егоров**, ведущий инженер отдела внутренних и внешних воздействий АО «Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт энергетических технологий «Атомпроект» (г. Санкт-Петербург), *с замечаниями*: не в полном объеме раскрыт вопрос влияния изменения положения токопроводящих элементов на КПД индукционного преобразования и воспроизводимость параметров инициирования; не отражено влияние формы и размеров порохового элемента (трубка, многоканальное зерно, пластина и т.д.) и условий заряжания (плотность заряжания, положения пороховых элементов в выстреле и т.д.) на эффективность ЭТХ системы; не приведена сравнительная оценка эффективности ЭТХ системы инициирования с системами инициирования перспективных артиллерийских систем; не приведена информация о валидации и верификации математической модели по результатам экспериментов.

6. **Ю. Ю. Луценко**, д-р физ.-мат. наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: из автореферата неясно, почему при анализе процесса диффузии магнитного поля граничные условия определяются температурой плавления именно в момент времени 2.5 мс; не указано, как влияет зависимость теплопроводности и теплоемкости топлива от температуры на результаты моделирования; в автореферате не приведены экспериментальные данные, подтверждающие результаты расчетов, в частности подтверждающие большую

эффективность проводника «ромашка». 7. **В. А. Бабук**, д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой «Космические аппараты и двигатели» Балтийского государственного технического университета «ВОЕНМЕХ» имени Д.Ф. Устинова, г. Калининград, *с замечаниями:* отсутствует информация, подтверждающая адекватность моделирования, не приводится информация о сопоставлении расчетных и экспериментальных данных; напрашивается проведение исследований теплообмена между ТЭН и топливом, т.к. при определенных значениях коэффициента теплоотдачи (закон Ньютона) предложенная система зажигания может оказаться неэффективной.

В отзывах отмечается, что разработка физико-математических моделей и проведение параметрических исследований теплофизических параметров элементов устройств индукционного многоочагового нагрева и зажигания реакционноспособных составов является востребованным для получения перспективных технологий зажигания высокоэнергетических топлив. С. И. Володченковым разработана аналитическая модель функционирования системы индукционного зажигания; осуществлен параметрический анализ модели и сделан вывод об эффективности предложенной системы зажигания; проанализировано влияние формы ТЭН на эффективность зажигания; на основе аналитических решений получены результаты, позволяющие прогнозировать профили температур в проводнике и прилегающих к нему слоях топлива в зависимости от геометрии проводника, мощности индукционного нагрева и теплофизических свойств веществ. Разработанный подход и математические модели могут быть использованы при проектировании устройств многоочагового зажигания метательных зарядов в высокоскоростных ускорителях твердых тел, а так же нагрева теплопроводных сред в замкнутых объемах.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **Г. В. Кузнецов** является известным специалистом в области численного и натурного моделирования теплофизических процессов, исследования теплообмена при фазовых переходах, сопряженного теплообмена; **В. И. Терехов** является известным специалистом в области численного исследования фундаментальных закономерностей теплофизики, тепломассообмена

в энергетических установках; **Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)** известен своими достижениями в области теплофизики, а именно математического моделирования процессов нагрева теплопроводных сред, исследований особенностей и эффективностей процессов теплообмена.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработаны математические модели и методики расчета задач сопряженного теплообмена при импульсном нагреве реакционно способных сред (плазмообразующего топлива и пиротехнического покрытия) индукционно нагреваемыми проводниками применительно к устройствам многоочагового зажигания метательных зарядов;

проведены теоретические исследования процессов многоступенчатого преобразования электрической энергии накопителя в тепловую энергию реакционноспособных сред в оригинальных схемах устройств индукционного нагрева теплопроводных сред;

определены эффективные параметры устройств импульсного индукционного зажигания реакционноспособных сред, включая генератор переменного магнитного поля, форму и размеры проводников, нагревающих реакционноспособную среду;

предложена специализированная конструкция короткозамкнутого проводника в форме «ромашка», эффективность которого при индукционном нагреве реакционноспособных сред подтверждена сравнительными расчетами;

создана методологическая и вычислительная основа для расчетов и проектирования устройств индукционного многоочагового зажигания реакционноспособных сред – высокоэнергетических топлив, пиротехнических покрытий и метательных зарядов.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изучено влияние различных параметров моделируемого устройства и условий теплообмена проводников со средой на динамику ее нагрева;

с помощью разработанной математической модели *раскрыты* особенности и закономерности последовательного преобразования одного вида энергии в другой в устройстве индукционного нагрева: электрической энергии накопителя в магнитную энергию соленоида с последующим ее преобразованием в тепловую энергию проводника и переносом его тепла в реакционноспособную среду.

Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:

разработано программно-алгоритмическое обеспечение, позволяющее проводить расчетно-аналитический анализ и эскизное проектирование индукционных устройств многоочагового зажигания метательных зарядов для высокоскоростных ствольных систем;

представлены возможности применения результатов исследования при разработке и создании импульсных устройств различного назначения для многоочагового бесконтактного нагрева реакционноспособных сред, в том числе в замкнутых объемах.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Полученные результаты могут применяться при проектировании и эксплуатации различных индукционных устройств с дистанционным бесконтактным тепловым воздействием на рабочие среды для различных практических приложений, проводимых в Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Казанском национальном исследовательском техническом университете им. А.Н.Туполева-КАИ, Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Сибирском государственном университете науки и технологий имени академика М.Ф. Решетнева (г. Красноярск), Институте гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск), на предприятиях: АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (г. Королев Московской области), РКК «Энергия» им. С.П. Королёва (г. Королев Московской области), АО «Всероссийский научно-исследовательский институт транспортного

машиностроения» (г. Санкт-Петербург), Российский федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (г. Саров Нижегородской области) и других организациях Российской Федерации. Результаты также могут использоваться при подготовке высококвалифицированных специалистов по направлению «Теоретическая теплотехника».

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

установлена сходимость расчетов по полученным результатам тестирования численных методик на точных аналитических решениях соответствующих задач;

установлено удовлетворительное согласование результатов расчета с модельным экспериментом по индукционной капельной деструкции проводника.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в том, что:

созданы новые математические модели процессов сопряженного теплообмена в устройствах электроимпульсного индукционного нагрева высокоэнергетических топлив и пиротехнических покрытий тонкостенными короткозамкнутыми проводниками различной формы;

разработаны алгоритм и методика их численно-аналитической реализации;

исследованы особенности процесса импульсного индукционного нагрева плазмозамещающих реакционноспособных сред применительно к задачам многоочагового зажигания пороховых метательных зарядов и дополнительных зарядов высокоэнергетического топлива;

определены эффективные параметры индукционных устройств при различных условиях теплообмена проводников с реакционноспособными средами.

Личный вклад соискателя состоит: в участии при определении цели, постановке задач и построении точных аналитических решений, выборе численных методик и их тестировании, обработке и анализе результатов, подготовке статей и докладов на конференциях; самостоятельной разработке и реализации в пакете MathCad методики численного и численно-аналитического моделирования работы индукционного устройства в различных модификациях; выполнении параметрических исследований; проведении сравнения результатов

математического моделирования с опытными данными модельного эксперимента по индукционной капельной деструкции проводника-ТЭН, проведен сравнительный анализ эффективности ТЭН оригинальной формы «ромашка».

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно-обоснованные математические модели и алгоритмы расчета процессов в оригинальных устройствах индукционного нагрева реакционноспособных сред для проектирования устройств многоочагового зажигания метательных зарядов в высокоскоростных ствольных системах, имеющие существенное значение для проектирования устройств многоочагового зажигания метательных зарядов в высокоскоростных ствольных системах.

На заседании 21.02.2020 диссертационный совет принял решение присудить **Володченкову С. И.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета



Шрагер Геннадий Рафаилович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Пикушак Елизавета Владимировна

21.02.2020