

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 26 июня 2020 года публичной защиты диссертации Агафонцева Михаила Владимировича «Исследование турбулентности в пламени с применением методов термографии и математического моделирования» по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Присутствовали 20 из 26 членов диссертационного совета, из них 8 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. Бубенчиков А. М., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 7. Бутов В. Г., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 8. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 9. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 10. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 11. Кульков С. Н., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 12. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 13. Макаров П. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 14. Миньков Л. Л., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 15. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 16. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |
| 17. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 18. Старченко А. В., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 19. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 20. 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 – 1, недействительных бюллетеней – 1) диссертационный совет принял решение присудить М. В. Агафонцеву 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 26.06.2020 № 433

О присуждении **Агафонцеву Михаилу Владимировичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Исследование турбулентности в пламени с применением методов термографии и математического моделирования»** по специальности **01.04.14** – Теплофизика и теоретическая теплотехника принята к защите 27.01.2020 (протокол заседания № 413) 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 **Агафонцев Михаил Владимирович**, 1992 года рождения.

В 2016 г. окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

С 01 сентября 2016 г. очно обучается в аспирантуре федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Работает в должности инженера учебной лаборатории кафедры физической и вычислительной механики; по совместительству – в должности ассистента кафедры физической и вычислительной механики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

Диссертация выполнена на кафедре физической и вычислительной механики 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, **Лобода Егор Леонидович**, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра физической и вычислительной механики механико-математического факультета, заведующий кафедрой.

Официальные оппоненты:

Колесников Анатолий Федорович, доктор физико-математических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук, лаборатория взаимодействия плазмы и излучения с материалами, заведующий лабораторией

Борисов Борис Владимирович, доктор физико-математических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», научно-образовательный центр И. Н. Бутакова, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук**, г. Новосибирск, в своем положительном отзыве, подписанном **Емельяновым Алексеем Алексеевичем** (кандидат физико-математических наук, лаборатория радиационного теплообмена, ведущий научный сотрудник), указала, что развитие бесконтактных методик измерения пульсаций температуры в пламени с использованием инфракрасных камер является актуальной задачей. Тематика диссертационной работы относится к приоритетному направлению развития науки, технологий и техники в Российской Федерации «8. Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика», соответствует п. 27 «Технологии эффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе» Перечня критических технологий Российской Федерации, утвержденным Указом Президента РФ от 07.07.2011 № 899. М. В. Агафонцевым

обоснованы спектральные интервалы в средневолновом ИК-диапазоне для исследования поля температуры в пламени и для регистрации экранированных пламенем объектов с применением ИК-термографии; предложена методика оценки масштабов неоднородностей температуры в турбулентном диффузионном пламени; показано соответствие характеристик крупномасштабных неоднородностей температуры и гидродинамической структуры; в зависимости от частоты внешнего акустического воздействия определены условия повышения скорости сгорания исследуемых горючих материалов. Важным для развития существующих знаний о турбулентном горении является экспериментальное обоснование соответствия между характеристиками пульсаций скорости и температуры в турбулентном пламени. Для математического моделирования турбулентного горения может быть полезной отмеченное в работе характерное распределение турбулентного числа Рейнольдса в диффузионном факеле. Значимым для практики является физическое обоснование выбора частоты внешнего акустического воздействия на пламя, приводящего к повышению скорости сгорания топлива.

Соискатель имеет 58 опубликованных работ, из них по теме диссертации опубликовано 35 работ, в том числе в рецензируемых научных изданиях опубликовано 6 работ (из них в зарубежном научном журнале, входящем в Web of Science, опубликована 1 работа; в российском научном журнале, переводная версия которого входит в Web of Science, опубликована 1 работа; в российских научных журналах, входящих в Web of Science, опубликовано 2 работы; в российском научном журнале, входящем в Scopus, опубликована 1 работа), в электронных сборниках материалов конференций, представленных в зарубежных научных изданиях, входящих в Web of Science и / или Scopus, опубликовано 11 работ; в сборнике научных трудов опубликована 1 работа; в прочих сборниках материалов международных и всероссийских (в том числе с международным участием) научных и научно-технической конференций и симпозиумов опубликовано 16 работ; свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ получено 1. Общий объем публикаций – 11.29 а.л., авторский вклад – 4.64 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. Лобода Е. Л. Выбор спектрального интервала для измерения полей температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем высокотемпературных объектов с применением методов ИК-диагностики / Е. Л. Лобода, В. В. Рейно, **М. В. Агафонцев** // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 2. – С. 124–128. – 0.31 / 0.2 а.л.

2. Лобода Е. Л. Оценка масштабов турбулентности в пламени при диффузионном горении дизельного топлива / Е. Л. Лобода, О. В. Матвиенко, **М. В. Агафонцев**, В. В. Рейно // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2016. – Т. 42, № 4. – С. 100–114. – 0.86 / 0.36 а.л.

3. Лобода Е. Л. Применение методов термографии для оценки масштабов турбулентности в пламени / Е. Л. Лобода, О. В. Матвиенко, **М. В. Агафонцев**, В. В. Рейно // Оптика атмосферы и океана. – 2018. – Т. 31, № 12. – С. 1001–1006. – 0.31 / 0.14 а.л.

На автореферат поступило 9 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **В. П. Вавилов**, д-р техн. наук, проф., заведующий Научно-производственной лабораторией «Тепловой контроль» Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечанием*: из текста автореферата неясна связь между различными выбранными спектральными интервалами и пространственно-частотным спектром температуры пламени. 2. **Г. А. Доррер**, д-р техн. наук, проф., профессор кафедры информационно-управляющих систем Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, *с замечанием*: чувствуется некоторая небрежность в использовании обозначений, что затрудняет понимание работы: не пояснено, чем отличается T от T' , что означает u_i' (формула 1), что такое k (стр. 14), Ri_t , Fr_t , (таблица 1) и др. 3. **А. Г. Коротких**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор научно-образовательного центра им. И.Н. Бутакова Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: на рисунке 7 масштаб температур не информативен: обозначены не все зоны пламени

с разными значениями числа Рейнольдса Re_t , и указанные номера зон не соответствуют описанию областей течений в тексте под рисунком; отсутствует сравнительная оценка значений числа Re_t по областям течений для исследуемых образцов топлив, представленных в таблице 3. 4. **В. А. Перминов**, д-р физ.-мат. наук, доц., профессор Отделения контроля и диагностики Национального исследовательского Томского политехнического университета, *с замечаниями*: в автореферате имеются опечатки и неточности; в названии работы указывается, что исследование проводилось, в том числе, с использованием математического моделирования, а в автореферате практически отсутствует такая информация; отсутствует информация о сравнении полученных результатов с данными других авторов. 5. **О. Ю. Семенов**, канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиоэлектроники и электроэнергетики Сургутского государственного университета, *без замечаний*. 6. **А. В. Тупикин**, д-р физ.-мат. наук, старший научный сотрудник научно-исследовательского сектора «Горение в газовых потоках» в составе лаборатории №4 Института теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск, *с замечаниями*: не со всеми утверждениями автора можно согласиться, сомнение вызывает обоснование оценки характерных размеров турбулентности, в частности, приведенный энергетический баланс; слабо раскрыта актуальность тематики работы; отсутствие схемы эксперимента создает неудобства для понимания написанного, не позволяет оценить геометрические размеры изучаемых объектов; не совсем понятен термин «потенциальная энергия факела»; ничего не сказано об алгоритмах и методах при численном моделировании, практически не отражены результаты расчетов; и *с вопросом*: по каким признакам определялась вершина факела? 7. **И. Р. Хасанов**, д-р техн. наук, главный научный сотрудник Всероссийского ордена «Знак Почета» научно-исследовательского института противопожарной обороны МЧС России, г. Балашиха Московской области, *с замечаниями*: представленный в автореферате рис. 1 следовало бы дополнить описанием размерностей координат; в автореферате не указано, при горении какого горючего материала получены спектры изменения температуры в пламени при воздействии инфразвука (рис. 4). 8. **Г. Ф. Костин**, д-р техн. наук, доц., профессор кафедры прикладной механики Миасского филиала Челябинского государственного университета, *с замечаниями*: масштабы осей, например вертикальной оси на рисунке

3, можно было бы в значащем диапазоне экспериментальных данных уменьшить, и тогда, возможно, выделились бы колебания с частотой 4–5 Гц и на рисунке 3с; на рисунке 3 имеется несоответствие обозначений a, b, c и $a, б, в$; в разделе о перспективах дальнейшей разработки темы требуется обоснование метода использования томографии. 9. **О. С. Попкова**, канд. техн. наук, доц., доцент кафедры «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета, **А. В. Дмитриев**, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Теоретические основы теплотехники» Казанского государственного энергетического университета, *с замечаниями*: в автореферате приведены термограммы (рис. 5 и рис. 6) в черно-белом варианте, что не позволяет оценить распределение температур.

В отзывах отмечается, что актуальность темы исследования связана с потребностью в разработке активных методов контроля режимов горения, реализуемых при различных технологических процессах, а также необходимостью изучения физики распространения природных и техногенных пожаров. М. В. Агафонцевым получены результаты, связанные как с определением спектрального интервала в ИК-диапазоне для термографических исследований, так и непосредственно с закономерностями в процессах горения жидких и твердых топлив; установлена корреляция между температурными неоднородностями и турбулентными пульсациями скоростей, и представлены свидетельства подобия пространственных характеристик процесса; впервые предложена методика оценки масштабов крупных турбулентных структур на основе экспериментальных данных, а также ряда теоретических оценок. Полученные данные могут быть использованы для корректирования существующих математических моделей турбулентности, что позволит повысить точность соответствующих расчетов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **А. Ф. Колесников** является известным специалистом в области получения, диагностики и применения низкотемпературной плазмы для моделирования аэродинамического нагрева; экспериментального исследования теплообмена в до- и сверхзвуковых потоках плазмы; термохимических испытаний теплозащитных материалов и элементов тепловой защиты в высокоэнтальпийных газовых потоках; численного моделирования течений индукционной плазмы и теплообмена;

исследования явлений самоорганизации в газовых разрядах; исследования анизотропии материалов и окружающего пространства; **Б. В. Борисов** является известным специалистом в области численного исследования процессов теплообмена в твердых телах, в потоках жидкостей и газов с учетом химических реакций, фазовых переходов и межфазовых (тепловых и гидравлических) взаимодействий; **Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН** известен своими достижениями в области теплофизики и теоретической теплотехники, теплопереносе в системах с фазовыми превращениями, теплопереносе в однофазных системах, теплообмена в дисперсных системах, гидродинамической устойчивости и турбулентности, вихревых течений, многофазных течений, динамике разреженных газов, теплофизических свойств веществ, теплофизических основ создания новых материалов, наноразмерных систем, теплофизических процессов в энергетике, топливных элементах и водородной энергетике, низкотемпературной плазмы.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

предложены рекомендации по выбору спектрального интервала для термографических исследований процессов горения в средневолновом ИК-диапазоне;

доказана цикличность процесса диффузионного горения жидких углеводородных топлив на свободной поверхности, а также твердых растительных горючих материалов;

установлено, что характерные частоты, проявляющиеся в спектре пульсации температуры, связаны с перемещением температурных неоднородностей;

установлено, что воздействие на пламя гармоническими пульсациями давления с частотами, соответствующими частотным максимумам в спектре пульсации температуры, приводит к интенсификации горения;

доказана взаимосвязь и согласование геометрических размеров между температурными неоднородностями в «мгновенном» поле температуры в пламени и турбулентными структурами в поле скоростей;

предложен способ оценки размеров крупных турбулентных структур в пламени по спектру пульсации температур;

предложена методика оценки турбулентного числа Рейнольдса Re_t в факеле пламени на основе экспериментальных данных, полученных с помощью ИК-термографии.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

разработаны рекомендации для выбора узкополосного спектрального интервала при исследовании процессов горения в средневолновом ИК-диапазоне позволяющие производить корректные бесконтактные измерения температуры;

разработан метод оценки масштабов крупных турбулентных структур в пламени по спектру пульсации температуры, что позволит увеличить точность расчетов при моделировании турбулентного горения;

применительно к проблематике диссертации результативно использована комбинация бесконтактных оптических методов ИК-термографии и PIV-диагностики для оценки масштабов турбулентности в пламени; методика, используемая при численном моделировании турбулентных потоков.

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

разработаны подходы для оценки масштабов турбулентности в пламени по спектру пульсации температуры в нем;

определена цикличность процесса диффузионного горения и взаимосвязь между тепловыми неоднородностями в пламени, пульсациями температуры и турбулентной структурой течения;

представлены рекомендации по выбору спектрального интервала для исследования полей температуры в пламени в средневолновом ИК-диапазоне;

представлены результаты, полученные при исследовании воздействия гармоническими пульсациями давления с малой амплитудой на факел пламени, которые могут быть использованы при конструировании новых горелочных устройств для дополнительного контроля режима горения.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанная автором методика оценки масштабов турбулентности в пламени на основе экспериментальных данных может найти применение в учебном процессе вузов и в научных исследованиях, направленных на развитие теории диффузионного горения углеводородных топлив, в том числе в следующих

организациях: Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН (г. Новосибирск), Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН (г. Новосибирск), Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН (г. Москва), Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН (г. Томск); Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева, Сургутский государственный университет, Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Национальный исследовательский Томский государственный университет и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

для экспериментальных исследований результаты получены с использованием калиброванного измерительного оборудования научного класса;

теория, используемая при анализе спектров излучения, основана на известных, проверяемых данных излучения маркерных газов;

теория, используемая для оценки масштабов турбулентности в пламени и характеристик течения в нем, *согласуется* с экспериментальными результатами, полученными разными способами, основана на известных предположениях и внутренне не противоречива;

использованы классические подходы к обработке сигналов, получаемых в ходе анализа экспериментальных данных.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в представлении научно обоснованного выбора узкополосных фильтров в средневолновом ИК-диапазоне для исследования поля температуры в пламени и регистрации экранированных пламенем объектов с применением методов ИК-термографии. Установлена цикличность процесса горения и взаимосвязь между крупными температурными неоднородностями и турбулентными структурами в поле скоростей в пламени; на основе анализа спектров пульсации температуры в пламени при диффузионном горении впервые предложена методика оценки масштабов крупных турбулентных структур и произведен критериальный анализ разных участков пламени; установлено, что при совпадении частоты воздействия с характерной частотой пульсации в пламени увеличивается высота пламени

и скорость выгорания топлива, а воздействие с некоторыми другими частотами приводит к появлению на соответствующей частоте частотных максимумов в спектре пульсации температуры в пламени.

Личный вклад соискателя состоит в: подготовке экспериментальных установок; настройке регистрирующего оборудования; непосредственном участии в получении исходных данных и научных экспериментах; обработке и интерпретации экспериментальных данных; участии в разработке программы ЭВМ «TempSpectrum-v.1.»; самостоятельной численной реализации этой программы для анализа спектров изменения температуры в пламени, проведении расчетов по численному моделированию процесса горения n-декана в программном комплексе, разработанным доктором физико-математических наук О. В. Матвиенко; совместном с научным руководителем анализе и обсуждении результатов исследований; подготовке публикаций по теме диссертации.

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 содержится решение научной задачи по исследованию полей температуры и турбулентности в пламени, имеющей значения для развития теплофизики и теоретической теплотехники.

На заседании 26.06.2020 диссертационный совет принял решение присудить **Агафонцеву М. В.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 8 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 – 1, недействительных бюллетеней – 1.

Председатель
диссертационного совета



Шрагер Геннадий Рафаилович

Ученый секретарь
диссертационного совета

Пикуцак Елизавета Владимировна

26.06.2020