

ОТЗЫВ

научного консультанта профессора Ципилева Владимира Папиловича
на диссертационную работу Яковлева Алексея Николаевича
«ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОГО И
ЭЛЕКТРОННО-ПУЧКОВОГО ИМПУЛЬСНОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ РАЗЛИЧНЫХ КЛАССОВ».

Яковлев Алексей Николаевич, 1971 года рождения, в 1994 г. окончил Физико-технический факультет Томского политехнического университета по специальности «Экспериментальная ядерная физика и физика плазмы» и получил квалификацию инженера-физика. В 2009 г. окончил магистратуру Томского политехнического университета по направлению «Менеджмент в научно-образовательной сфере». В 2002 г. защитил кандидатскую диссертацию по специальности «Физика конденсированного состояния», а в 2007 г. ему присвоено звание «доцент».

С 1994 г. по 2020 г. работал в ТПУ, прошел все ступени исследователя, преподавателя и руководителя в вузе: лаборант, инженер, младший научный сотрудник, ассистент, доцент, заведующий кафедрой, заместитель проректора по учебной работе, директор института, директор инженерной школы, проректор по работе с индустриальными партнерами и предпринимательству.

С 2020 назначен на должность временно исполняющего обязанности ректора Кузбасского государственного технического университета им.Т.Ф. Горбачева, а в 2021 году на конкурсной основе избран ректором этого университета, где продолжает работу по настоящее время.

К работе над докторской диссертацией приступил в 2002 году. За короткий промежуток времени освоил методологию и методики синхронных многопараметрических измерений процессов и характеристик взрывного разложения азидов тяжелых металлов (АТМ), а также численное моделирование и расчет задач зажигания азидов тяжелых металлов импульсом лазерного излучения. В 2003 году вышла в печати с его участием (Известия ТПУ. Т. 306, №6) основополагающая статья, в которой убедительно показано, что наиболее вероятным механизмом инициирования азидов тяжелых металлов является тепловой микроочаговый с образованием «горячих точек» в окрестности поглощающих наноразмерных металлических включений, присутствующих в матрице АТМ.

В последующие годы Алексей Николаевич накапливал опыт комплексных исследований различных типов энергетических материалов в

широком диапазоне воздействующих факторов, участвуя в совершенствовании лазерного исследовательского стенда, окончательный вид которого опубликован только в 2019 году (Изв. вузов. Физика. Т. 62, №5), оптическая схема которого демонстрировалась в его докладе. За это время был накоплен с его участием огромный экспериментальный материал по лазерному импульсному инициированию как АТМ, так и вторичных энергетических материалов (тэн, ФТДО, пиротехническая смесь ПХА+Al) и изучению свойств инертных материалов как с точки зрения поглощающей способности, так и люминесценции под действием лазерных и электронных пучков.

Поскольку большинство энергетических материалов представляют собой порошки, которые с оптической точки зрения являются диффузно рассеивающими средами, Яковлев А.Н. проявил интерес к выявлению связей между освещенностью поверхности, задаваемой лазерным пучком, и пространственной освещенностью в объеме энергетических материалов, которая определяет температуру нагрева и, соответственно, реакционную способность горячих точек. Для решения вопроса необходимо было изучить закономерности светорассеяния в диффузно-рассеивающих средах. С этой целью он в совершенстве овладел методами имитационного моделирования (методами Монте-Карло) в общем и применительно к рассеянию фотонов в порошках – в частности. Решению задач светорассеяния включая разработку алгоритмов применительно к инициированию порошков энергетических материалов посвящена глава 4 диссертации. В настоящее время Алексей Николаевич является одним из ведущих специалистов в данной области знаний.

Уже на ранних этапах исследований Алексей Николаевич проявил интерес к обобщениям результатов, к установлению общих закономерностей. Однако такая возможность появилась только где-то к 2020 году, когда сформировались представления, основанные на собственных результатах, и появились достоверные сведения от других исследователей. Одновременно он проявлял интерес к инициированию этих же типов энергетических материалов при воздействии на них пучком ускоренных электронов. При рассмотрении общих закономерностей инициирования при воздействии лазерного и сильноточного электронного пучков была высказана идея о едином механизме инициирования и доказана им единая природа образования горячих точек при лазерном и электронно-пучковом воздействии.

В настоящий момент сферы научных интересов Яковлева А.Н. – материаловедение, физика конденсированного состояния, источники света и

световые приборы, светотехника, агробиофотоника. В портфеле А.Н. Яковлева 2 патента, 8 свидетельств на программные продукты. Общее количество научных публикаций – около 200. Количество научных публикаций в ведущих рецензируемых журналах, в том числе Web of Science, Scopus и входящих в список ВАК – 28, индекс Хирша (Scopus) – 12.

Яковлев А.Н. известен как специалист в области физики конденсированного состояния и материаловедения за последние годы работал как исполнителем, так и руководителем научных программ и проектов:

- исполнитель грантов Министерства образования РФ для научных исследований (Грант №01980004587, 1999 г., Грант №01200008652, 2000-2004 гг.);
- исполнитель грантов Российского фонда фундаментальных исследований (Грант №01-02-18035, 2001 г., Грант №04-02-16339, 2004-2007 г.);
- исполнитель Государственного задания «Наука» по тематическому плану НИР Томского политехнического университета по заказу Министерства науки и высшего образования РФ (2004 - 2009 гг.);
- исполнитель проекта: «Создание научно-технического обеспечения технологии непрерывной подготовки научных кадров по приоритетным направлениям науки и техники в нецентральных ВУЗах» по заказу Федерального агентства по образованию РФ (2005 г.);
- исполнитель комплексной программы развития Томского политехнического университета 2001 - 2005 гг., а также на 2006 - 2010 гг.;
- разработчик программы развития и становления ТПУ как Национального исследовательского университета 2009 - 2018 гг.;
- разработчик программы повышения конкурентоспособности Национального исследовательского Томского политехнического университета среди ведущих мировых научно-образовательных центров 2013 - 2020 гг.;
- руководитель проекта «Разработка высокоэффективных и надежных полупроводниковых источников света и светотехнических устройств и организация их серийного производства» по постановлению Правительства №218 «О кооперации вузов и предприятий» при участии соисполнителей Томский государственный университет, Томский университет систем управления и радиоэлектроники, реализованный на

базе ОАО «Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов» - 2010 - 2013 гг.;

- руководитель проекта «Разработка и организация серийного производства локальных станций водоочистки Гейзер ТМ-1,5» на базе Томского политехнического университета в рамках Губернаторской программы Томской области «Чистая вода»;
- член коллектива научной школы академика В.Е. Панина – ИШ-101 (2016 г.);

в том числе по теме диссертационной работы:

- «Инициирование взрывного разложения взрывчатых веществ и пиротехнических составов импульсом радиации» (РФФИ 06-03-2006 – 2008);
- «Закономерности взрывного разложения энергетических материалов при инициировании внешним импульсом и проблемы создания чувствительных, быстродействующих лазерных капсулей-инициаторов на их основе» (РФФИ 08-08-00153- а 2008 –2010);
- «Лазерные оптоволоконные системы инициирования – альтернатива электрическим системам по безопасности и помехозащищенности» (ФЦП, Госконтракт № П517 2010 – 2012).

Следует отметить высокую работоспособность диссертанта, он сочетал все виды деятельности с огромной административной работой, а также наставничеством. По теме диссертационной работы им подготовлены: 1 кандидат наук – Разин А.В., 1 научно-квалификационная работа – Форт Е.В.

Диссертационные исследования Яковлева А.Н. посвящены актуальным проблемам в области физики конденсированного состояния, связанные с лазерным и электронно-пучковым инициированием четырех типов взрывчатых веществ, что позволило получить данные для составления паспортов чувствительности исследуемых энергетических материалов.

Диссертация состоит из введения, 8 глав, основных результатов и выводов, заключения. Изложена на 377 страницах машинописного текста, включая 99 рисунков и 18 таблиц. Библиография включает 254 наименования.

Научная новизна диссертационного работы Яковлева А.Н. в следующем:

1. Впервые разработана и сформулирована экспериментально обоснованная физическая модель формирования горячих точек в прозрачных прессованных образцах азидов тяжелых металлов, чистого (не содержащего

специально введенных примесей) тэна, ФТДО и ПХА при лазерном воздействии ($\lambda_0 = 1064\text{ нм}$), основанная на явлении низкопорогового оптического пробоя на поглощающих микронеоднородностях. Показано, что воздействие лазерного импульса в области фундаментального поглощения ($\lambda = 266\text{ нм}$) формирует тепловой очаг в виде лазерно-индуцированной микроплазмы, образующейся в момент импульса облучения в тонком (около 10^{-5} см) приповерхностном слое, а в дальней ИК - области ($\lambda = 10600\text{ нм}$) – в окрестности поглощающей неоднородности (в случае азидов тяжелых металлов) или в приповерхностном (толщиной около 10^{-3} см) слое (в случае тэна или ФТДО).

2. Впервые обобщены и сопоставлены результаты экспериментальных и теоретических исследований поведения энергетических материалов различных классов, выявлены основные закономерности, общности в их поведении и принципиальные различия. Показано, что природа лазерного импульсного инициирования, как чистых порошков тэна, так и с добавками нано- и микроразмерных частиц алюминия и сажи, является тепловой микроочаговой.

3. Установлено, наиболее вероятное объяснение фазового состояния при зажигании ЭМ следующее: в азидах тяжелых металлов процесс происходит в твердой фазе, в тэне и ФТДО – в газовой, а в ПХА + Al – в жидкой фазе.

4. Впервые с помощью методов и алгоритмов Монте-Карло установлены закономерности светорассеяния в прессованных порошках прозрачных энергетических материалов в пространственно ограниченных слоях (таблетках). Установлена связь между пространственной освещенностью в объеме образца, коэффициентом диффузного отражения и освещенностью его поверхности.

5. Показано, что наблюдаемый экспериментально размерный эффект лазерного инициирования определяется тремя основными факторами – закономерностями светорассеяния, возникновением спекл-структуры в объеме образца и вероятностью попадания оптической неоднородности в каустику лазерного пучка.

6. Впервые проведено численное моделирование и расчет задачи зажигания азид свинца и тэна пучком ускоренных электронов. Определены пороги инициирования, размеры и наиболее вероятное количество стримеров для этих материалов.

7. Впервые установлены шесть основных критериев лазерного импульсного инициирования энергетических материалов в области прозрачности матрицы, вытекающие из установленных связей между пространственно-

временными параметрами воздействующего импульса и пространственно-временными релаксационными масштабами энергетических материалов.

8. Впервые сформулированы научные представления, адекватно объясняющие с единых позиций имеющиеся к настоящему времени результаты исследований закономерностей лазерного и электронно-пучкового инициирования ЭМ: формирование теплового микроочага является результатом оптического пробоя (при лазерном) и стримерного пробоя (при электронном) внешнем импульсном воздействии.

Теоретическая значимость состоит в следующем. Впервые сформулированы модельные представления, с единых позиций описывающие поведение различных типов ЭМ при лазерном и электронно-пучковом импульсном инициировании, а именно, с позиций локализации энергии внешнего импульса и образования высокотемпературных тепловых очагов (горячих точек) в результате низкопорогового оптического (электрического) пробоя в окрестности оптических (или электрических) микронеоднородностей.

Разработана математическая модель и алгоритмы численного расчета формирования горячих точек в тетранитрате пентаэритрита, содержащем включения частиц сажи и алюминия различных размеров, с учетом длительности лазерного импульса и сечения поглощения частиц. Показано, что каждой длительности импульса лазерного излучения соответствует размер частиц, в окрестности которых формируется горячие точки с максимальной температурой, а тепловые микроочаги имеют максимальный запас тепла и максимальную реакционную способность.

Впервые разработаны алгоритмы метода Монте-Карло для моделирования закономерностей светорассеяния в прозрачных порошках энергетических материалов ограниченных размеров (таблетки). Алгоритмы использованы для численного расчета пространственной освещенности в объеме порошков. Рассчитано распределение пространственной освещенности по глубине образца в зависимости от размера лазерного пучка, коэффициента диффузного отражения и альбедо однократного рассеяния. Выявлены особенности светораспределения, как в чистых прессованных порошках, так и порошках, содержащих поглощающие примеси (сажа, алюминий). Показано, что пространственная освещенность в объеме очень тонких слоев (менее средней длины свободного пробега фотонов) может превосходить освещенность, задаваемую лазерным пучком на поверхности образцов, до четырех крат, а в толстых (более 100 пробегов) – более десяти крат.

Практическая значимость работы определяется: разработанными аппаратными комплексами для исследования энергетических порогов зажигания (инициирования) и спектрально-кинетических характеристик процесса взрывного разложения в широком диапазоне изменений параметров воздействующего внешнего импульса; возможностью использования полученной базы данных (на уровне создания паспорта характеристик чувствительности для каждого типа энергетических материалов) и модельных представлений для прогнозирования поведения энергетических материалов в штатных ситуациях, предсказательных оценок энергетических порогов зажигания и целенаправленным управлением чувствительностью энергетических материалов к импульсному лазерному воздействию; возможностью использования результатов для оптимального и эффективного применения исследованных объектов в исполнительных устройствах различного назначения.

Достоверность полученных результатов и обоснованность выводов обусловлена корректностью постановки задач исследования, комплексным подходом к их решению, использованием апробированных методик проведения экспериментов по лазерному импульсному инициированию азидов тяжелых металлов и тэна, отработанной методикой приготовления образцов, анализом экспериментальных данных в рамках классических представлений о тепловом очаговом зажигании энергетических материалов под воздействием внешнего импульса с использованием классических представлений о механизмах оптического пробоя и разрушения конденсированных сред лазерным импульсом, известных представлений о механизме электрического пробоя инертных диэлектриков и энергетических материалов при облучении электронным пучком, использованием апробированных алгоритмов моделирования и численных расчетов задач зажигания энергетических материалов лазерным импульсом, использованием апробированных алгоритмов имитационного моделирования (с использованием методов Монте-Карло) светорассеяния в прессованных порошках (таблетках) энергетических материалов, сравнениями с результатами других авторов и обобщениями на основе этих сравнений.

Результаты исследований по теме Яковлева А.Н. были широко представлены на международных и всероссийских конференциях, опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выдвигаемые

для научной защиты, которые свидетельствуют о личном вкладе в науку. В работе Яковлева А.Н. приводятся сведения о практическом использовании полученных результатов, даются рекомендации по использованию научных выводов.

Считаю, что поставленные задачи решены, а цели работы достигнуты. Уверен, что в лице Яковлева Алексея Николаевича сформировался высококвалифицированный исследователь, поставивший науку о воздействии лазерного и электронно-пучкового воздействия на энергетические и инертные материалы на значительно более высокий уровень. Считаю, что Алексей Николаевич заслуживает ученой степени доктора технических наук по специальностям: 1.3.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника и 1.3.8. – Физика конденсированного состояния. Надеюсь, что Алексей Николаевич активно будет продолжать научную деятельность и сочетать ее с административной работой на благо нашего Отечества.

Научный консультант, профессор
отделения материаловедения
Инженерной школы новых
производственных технологий
Национального исследовательского
Томского политехнического
университета

(634050, Томск, пр.Ленина, 30, +7
(3822) 60-63-33, tpu@tpu.ru), доктор
физико-математических наук,
(01.04.17 – химическая физика, в
том числе физика горения и взрыва)
профессор

e-mail: tsipilev@tpu.ru

тел: +7(3822) 606292

Подпись заверяю:

Ученый секретарь Национального
исследовательского 
политехнического университета

20.05.2022

Ципилев Владимир Папилович



Кулинич Екатерина Александровна

