

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.150.01 НА БАЗЕ
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
НАУКИ ИНСТИТУТА ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ И ГОРЕНИЯ
ИМ. В. В. ВОЕВОДСКОГО СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК МИНИСТЕРСТВА НАУКИ И ВЫСШЕГО
ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА
СОИСКАНИЕ УЧЁНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 30.11.2022, № 29

О присуждении Прууэлу Эдуарду Рейновичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора физико-математических наук.

Диссертация **«Скоростная рентгеновская томография и уравнение состояния продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ»** в виде рукописи по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» принята к защите 26 августа 2022 г., протокол № 21, диссертационным советом 24.1.150.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института химической кинетики и горения им. В. В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук (ИХКГ СО РАН), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3, приказ о создании диссертационного совета № 1511/нк-от 25.11.2016 года.

Соискатель, **Прууэл Эдуард Рейнович**, 1975 года рождения, на момент защиты диссертации работает в должности заместителя директора по научным вопросам Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева Сибирского отделения Российской академии наук» (ИГиЛ СО РАН).

Диссертация выполнена в лаборатории физики взрыва ИГиЛ СО РАН.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук **Лебедев Александр Иванович**, главный научный сотрудник отдела 0340-07 Института физики взрыва, Федерального государственного унитарного предприятия РОССИЙСКИЙ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЯДЕРНЫЙ ЦЕНТР - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики (ФГУП "РФЯЦ - ВНИИЭФ") Государственной корпорации по атомной энергии "Росатом", г. Саров;

доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник **Долгобородов Александр Юрьевич**, заведующий лабораторией ударно-волновых воздействий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва;

доктор физико-математических наук, профессор **Киселев Сергей Петрович** ведущий научный сотрудник Лаборатории 6 "Физика многофазных сред" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), г. Новосибирск - дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина (ФГУП «РФЯЦ – ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина»), г. Снежинск, в своём **положительном заключении**, подписанном доктором технических наук, главным научным сотрудником научно-исследовательского отдела №48, научно-исследовательского отделения №4 **Кашинцевым Владимиром Ивановичем**, кандидатом технических наук заместителем главного конструктора РФЯЦ-ВНИИТФ – начальником научно-исследовательского отделения №4 **Гармашевым Александром Юрьевичем**, кандидатом технических наук заместителем начальника научно-исследовательского отделения №4 **Смирновым Евгением Борисовичем**, утверждённом директором, кандидатом экономических наук **Железновым Михаилом Евгеньевичем**, указала, что данная диссертационная работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения учёных

степеней», утверждённом Постановлением правительства РФ от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции), а её автор, Прууэл Э.Р., заслуживает присвоения ему искомой учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Соискатель имеет 55 научных работ (из них 38 по теме диссертации), опубликованных в отечественных и международных рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК. Личный вклад соискателя в опубликованные работы составляет примерно 80%.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. High-speed X-ray transmission tomography for detonation investigation / O. V. Evdokov, A. N. Kozyrev, V. V. Litvinenko, L. A. Lukianchikov, L. A. Merzhievsky, **E. R. Prueel**, K. A. Ten, B. P. Tolochko, I. L. Zhogin, P. I. Zubkov // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2007. — Vol. 575, N 1. — P. 116–120.
2. Распределение плотности разлетающихся продуктов стационарной детонации тротила / **Э. Р. Прууэл**, Л. А. Мержиевский, К. А. Тен, П. И. Зубков, Л. А. Лукьянчиков, Б. П. Толочко, А. Н. Козырев, В. В. Литвенко // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 121–131.
3. Tomography of the flow field of detonation product using SR / К. А. Тен, **E. R. Prueel**, L. A. Merzhievsky, L. A. Lukjanchikov, B. P. Tolochko, I. L. Zhogin, L. I. Shekhtman // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. — 2009. — Vol. 603, N 1. — P. 160–163.
4. X-ray Transmission Tomography for Detonation Investigation / **E. R. Prueel**, K. A. Ten, V. M. Titov, L. A. Lukianchikov, L. A. Merzhievsky, P. I. Zubkov, B. P. Tolochko, I. L. Zhogin, V. Zhulanov, V. M. Aulchenko, L. I. Shekhtman // Proceedings Fourteenth International Detonation Symposium. — 2010. — P. 345–351.

5. Опыт применения синхротронного излучения для исследования детонационных процессов / В. М. Титов, **Э. Р. Прууэл**, К. А. Тен, Л. А. Лукьянчиков, Л. А. Мержиевский, Б. П. Толочко, В. В. Жуланов, Л. И. Шехтман // Физика горения и взрыва. — 2011. — Т. 47, № 6. — С. 3–15.
6. Реализация возможностей синхротронного излучения в исследованиях детонационных процессов / **Э. Р. Прууэл**, К. А. Тен, Б. П. Толочко, Л. А. Мержиевский, Л. А. Лукьянчиков, В. М. Аульченко, В. В. Жуланов, Л. И. Шехтман, В. М. Титов // Доклады Академии наук. Техническая физика. — 2013. — Т. 448, № 1. — С. 38–42.
7. Исследование ударно-волновых переходных процессов во взрывчатых веществах с помощью синхротронного излучения / К. А. Тен, **Э. Р. Прууэл**, А. О. Кашкаров, Л. А. Лукьянчиков, Л. А. Мержиевский, Ю. А. Аминов, Е. Б. Смирнов, А. К. Музыря, О. В. Костицын // Известия РАН. Серия физическая. — 2013. — Т. 77, № 2. — С. 254–256.
8. Исследование параметров детонационной волны и процессов конденсации в БТФ синхротронными методами / К. А. Тен, В. М. Титов, **Э. Р. Прууэл**, Л. А. Лукьянчиков, Б. П. Толочко, В. В. Жуланов, Л. И. Шехтман, Ю. А. Аминов, А. К. Музыря, О. В. Костицын, Е. Б. Смирнов // Научный вестник НГТУ. — 2013. — Т. 50, № 1. — С. 128–138.
9. Tomography of gas-dynamic characteristics of the detonation flow / **E. R. Prueel**, К. А. Тен, V. M. Titov, A. O. Kashkarov, L. A. Merzhievsky, A. K. Muzyrya, E. B. Smirnov, K. M. Prosvirnin // Proceedings Fifteenth International Detonation Symposium. — 2015. — P. 1219–1224.
10. Kashkarov A. O., Ershov A. P., **Prueel E. R.** On peculiarities of nearthreshold initiation of powder density explosive by air shock wave and by solid impactor // Journal of Physics: Conference Series. — 2016. — Vol. 754. — P. 052001.
11. Measurements of detonation propagation in the plastic explosive in charges of small diameters using synchrotron radiation / A. O. Kashkarov, **E. R. Prueel**, К. А. Тен, I. A. Rubtsov, S. I. Kremenko, K. M. Prosvirnin, A. N. Kiselev, I. E.

Kosolapov, O. V. Kostitsyn, B. G. Loboyko, A. K. Muzyrya // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 899. — P. 042004.

12. Восстановление синхротронным излучением газодинамических характеристик течения при детонации гексанитрогексаазаизовюрцитана по данным рентгеновской томографии / И. А. Рубцов, **Э. Р. Прууэл**, К. А. Тен, А. О. Кашкаров, С. И. Кременко, И. А. Спирин, Е. В. Халдеев // Боеприпасы XXI век. — 2018. — № 2. — С. 182–185.
13. **Прууэл Э. Р.**, Васильев А. А. Уравнение состояния продуктов газовой детонации. Учет формирования конденсированной фазы углерода // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 5. — С. 74–85.
14. Детонация ультрадисперсных взрывчатых веществ / А. П. Ершов, В. В. Андреев, А. О. Кашкаров, Я. Л. Лукьянов, Д. А. Медведев, **Э. Р. Прууэл**, И. А. Рубцов, Н. П. Сатонкина, С. А. Соловьев // Физика горения и взрыва. — 2021. — Т. 57, № 3. — С. 111–118.

На автореферат диссертации поступило 5 отзывов. Все отзывы положительные, четыре содержат замечания. Отзывы поступили от:

- чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н. **Ломоносова Игоря Владимировича**, и.о. директора Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН);
- доктора технических наук **Курепина Александра Евгеньевича**, начальника отдела ЦТЭФ Акционерного общества «Государственный научно-исследовательский институт машиностроения им. В.В. Бахирева» (АО «ГосНИИмаш»);
- кандидата технических наук **Вирченко Владимира Алексеевича**, начальника сектора 66 Федерального государственного унитарного предприятия «Специальное конструкторско-технологическое бюро «ТЕХНОЛОГ» (ФГУП СКТБ «ТЕХНОЛОГ»);

- доктора технических наук, доцента **Гуськова Анатолия Васильевича**, заведующего кафедрой Газодинамических устройств Новосибирского государственного технического университета (НГТУ);
- доктора технических наук, доцента **Карих Владимира Петровича**, главного научного сотрудника Акционерного общества «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (АО «ФНПЦ «Алтай»).

Замечания по автореферату касаются: 1) необходимости анализа точности методики восстановления газодинамических параметров течения по данным скоростной рентгеновской радиографии (**к.т.н. Вирченко В.А.**, **д.т.н. Карих В.П.**); 2) отсутствия сравнения методов синхротронного излучения и методов на основе современных рентгеновских трубок для исследования процессов взрыва (**д.т.н. Карих В.П.**); 3) отсутствия анализа влияния нарушения цилиндрической симметрии на точность восстановления параметров течения (**д.т.н. Карих В.П.**); 4) необходимости доработки уравнения состояния до возможности его применения в других вычислительных программах, например ANSYS Autodyne (**д.т.н. Курепин А.Е.**); 5) отсутствия связи главы с описанием модели уравнения состояния и главы с результатами экспериментальных исследований (**д.т.н. Карих В.П.**); 6) отсутствия доступа к численным значениям детонационных параметров полученным в эксперименте и вычисленным по численной модели (**к.т.н. Вирченко В.А.**); 7) вопроса о возможности использования рентгенографии для неразрушающего контроля качества изготовления взрывчатого вещества и операций снаряжения (**д.т.н. Гуськов А.В.**).

В положительных отзывах оппонентов имеются следующие замечания, вопросы и пожелания.

Долгобородов А.Ю. (1) отметил орфографические и стилистические ошибки, неточности цитирования; (2) указал неудачную формулировку на странице 65; (3) высказал пожелание собрать данные по исследованным составам.

Киселев С.П. (1) обратил внимание на изломы, которых не должно быть, на зависимостях давления от плотности полученных в разделе 2.2.2; (2) отметил неточность в граничных условиях на контактной границе продукты взрыва – ударно сжатый воздух; (3) высказал замечания к модели уравнения плотных газов, касающиеся вычисления термодинамики внутренних степеней свободы молекул в условиях плотных газов, сходимости алгоритма вычисления равновесного химического состава, способа задания параметра альфа потенциала $\epsilon_{\text{рб}}$ и точности определения термодинамических параметров при использовании в вычислениях небольших ансамблей молекул; (4) отметил неудачную формулировку на странице 139; (5) отметил, что в диссертации опущены многие технические подробности построения интерполяционных сеток и численных методов решения дифференциальных уравнений; (6) высказал замечание о слабой связи третьей главы с первыми двумя.

Лебедев А.И. (1) задал вопрос о точности определения плотности и восстанавливаемых через нее всех остальных газодинамических параметров течения; (2) высказано пожелание целенаправленно проанализировать точность методики.

Во всех отзывах отдельно отмечается, что указанные замечания не снижают научной и практической значимости диссертационной работы. Все отзывы заканчиваются выводом, что диссертационная работа Прууэла Э.Р. **полностью соответствует** требованиям, которые ВАК предъявляет к докторским диссертациям, а её автор – Прууэл Э.Р. – заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.17.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью оппонентов и сотрудников ведущей организации в области физики взрыва, а также скоростной рентгеновской радиографии и уравнения состояния продуктов детонации энергетических материалов, что подтверждается наличием у них публикаций ряда научных работ в данной области исследований, в том числе соответствующих тематике

диссертационного исследования соискателя и опубликованных в ведущих российских и международных журналах и изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

Разработана методика скоростной рентгеновской томографии цилиндрически-симметричных газодинамических течений, возникающих при детонации зарядов конденсированных взрывчатых веществ. Методика использует дополнительную информацию о структуре течения исследуемого процесса и позволяет значительно повысить точность восстановления пространственного распределения плотности.

Впервые реализована методика восстановления параметрического баротропного ($p = P(\rho)$) уравнения состояния продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ по данным скоростной рентгенографии. Методика основывается на подборе уравнения состояния, при котором за фронтом детонационной волны реализуется течение с рентгеновской тенью, хорошо соответствующей эксперименту.

Сформулирована и реализована модель уравнения состояния плотных газов с учетом равновесного химического состава. Модель основывается на классическом молекулярно-динамическом моделировании небольшого ансамбля взаимодействующих молекул и прямом определении давления и полной энергии системы. При этом равновесный состав подбирается методом реагирующего ансамбля Монте-Карло (Reactive Monte Carlo). Модель позволяет определять термодинамические параметры плотных газов в условиях взрыва в диапазоне температур от нормальных условий до 5 000 К и давлений до 50 ГПа.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики заключается в том, что экспериментальные результаты работы используются для уточнения параметров детонации и уравнений состояния продуктов взрыва энергетических материалов, используемых в РФЯЦ-ВНИИТФ, РФЯЦ-ВНИИЭФ и АО «ГосНИИмаш». Разработанные численные

модели уравнения состояния плотных газов позволяют оптимизировать детонационные характеристики взрывчатых составов.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что: *сделанные выводы и полученные научные результаты* основаны на применении современных экспериментальных методов, теоретических и численных подходов; *проведены детальные* экспериментальные измерения и осуществлен квалифицированный анализ погрешности, полученные результаты согласуются с известной совокупностью экспериментальных данных.

Личный вклад соискателя состоит в подготовке экспериментального оборудования станции, проведении взрывных экспериментов, в формулировке алгоритмов и реализации в виде программного кода методики восстановления газодинамических параметров детонационного течения; формулировке, реализации и тестировании модели уравнения состояния. Подготовка публикаций по теме диссертации осуществлялась совместно с соавторами работ.

Диссертация выполнена на высоком научном уровне и представляет собой законченное исследование с актуальными задачами и содержательными, фундаментальными и практически важными результатами. Материалы диссертации соответствуют требованиям специальности 1.3.17 (п.1 «экспериментальные методы исследования химической структуры и динамики химических превращений», п.7 «связь химической и физической природы веществ и систем с их термохимическими параметрами, характеристиками термического разложения, горения, взрывчатого превращения; термодинамика, термохимия и макрокинетика процессов горения и взрывчатого превращения», и п. 8 «взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; явления, порождаемые горением и взрывчатым превращением»). Соискатель Прууэл Э.Р. успешно ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы из зала, на замечания оппонентов, ведущей организации и в отзывах на автореферат. Соискатель согласился со всеми техническими замечаниями и пожеланиями, по научным вопросам были даны аргументированные и четкие ответы.

На заседании 30 ноября 2022 г. диссертационный совет постановил: за решение научной проблемы, связанной с реализацией методики скоростной рентгеновской радиографии и созданием модели уравнения состояния продуктов детонации энергетических материалов, присудить *Прууэлу Эдуарду Рейновичу* учёную степень доктора физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 12 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании и голосовании, из 24 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени - 18, против присуждения учёной степени - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета,

д-р хим. наук, доцент

Онищук Андрей Александрович

Ученый секретарь диссертационного совета,

канд. хим. наук

Поздняков Иван Павлович

«1» декабря 2022 г.

