

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 КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 12.10.2022, № 22

О присуждении Сорокину Ивану Викторовичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация *«Зажигание высокоэнергетических материалов, содержащих биметаллические энергоёмкие горючие»* в виде рукописи по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» принята к защите 01 июля 2022 г., протокол № 17, 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, *Сорокин Иван Викторович*, 1992 года рождения, на момент защиты диссертации работает в должности ведущего инженера ИХКГ СО РАН. В 2021 году соискатель окончил аспирантуру Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (НИ ТПУ). С 2021 года И.В. Сорокин работает в ИХКГ СО РАН.

Диссертация выполнена в Инженерной школе энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), г. Томск.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, доцент **Коротких Александр Геннадьевич**, профессор научно-образовательного центра И. Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ), г. Томск.

Официальные оппоненты:

1. **Нурмухаметов Денис Рамильевич**, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории энергетических соединений и нанокompозитов Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр угля и углекислоты Сибирского отделения Российской академии наук» Института углекислоты и химического материаловедения (ФИЦ УУХ СО РАН), г. Кемерово;

2. **Ягодников Дмитрий Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Ракетные двигатели» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», (МГТУ им. Н. Э. Баумана), г. Москва;

дали **положительные отзывы** на диссертацию.

Ведущая организация, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск, в своём **положительном заключении**, подписанном доктором технических наук, главным научным сотрудником, заведующим лабораторией физико-химических основ создания энергетических конденсированных систем **Козыревым Николаем Владимировичем**, утверждённом директором, член-корреспондентом РАН **Сысолятиным Сергеем Викторовичем**, 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 текущей редакции), а её автор, Сорокин И.В.,

заслуживает присвоения ему искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17 – «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

В положительном заключении ведущей организации имеются следующие замечания и вопросы.

- (1) Оформление подписей к иллюстрациям 3.1–3.3 не соответствуют принятым стандартам. Указанные иллюстрации содержат рисунки а), б), в), и т.д., содержание которых необходимо перечислить после 3.1–3.3.
- (2) С. 83, рисунки 3.6 (а), 3.6 (б). В тексте отсутствуют пояснения параметров на осях ординат: m , m_0 , q_s , q_{\max} . В списке обозначений (С. 170) расшифровка не приводится. Таким образом, необходимо уточнить, что за процессы изображены на рисунках. Данное замечание относится также к рисункам 3.7 (а, б), 3.8 (а, б), 3.10 (а, б) и 3.11 (а, б).
- (3) С. 84, рисунок 3.7 (а). Согласно тексту, на рисунке изображены ТГ-кривые (результаты термогравиметрических измерений). Численные значения, указанные на оси ординат, представляют соотношения m/m_0 , то есть соотношение массы образца при любой температуре (в диапазоне измерений 30–1200 °С) к исходной массе. Следовательно, в начале эксперимента эти параметры должны быть равны друг другу, величина соотношения может меняться только при нагреве. Однако, на рисунке 3.7 (а) этому критерию удовлетворяет только ТГ-кривая 1 (μAl). Для остальных ТГ-кривых величина соотношения m/m_0 в начальной точке эксперимента варьируется от 1.2 до 2.2. Данное замечание относится также к рисункам 3.8 (а), 3.10 (а) и 3.11 (а).
- (4) С. 84, рисунок 3.7 (б), на котором представлены (согласно тексту) ДСК-кривые. Численные значения, указанные на оси ординат, представляют соотношения q_s/q_{\max} . Для ДСК-кривой 1 (μAl) это соотношение равно нулю в исходной точке эксперимента, что возможно лишь в случае если, $q_s = 0$. Для остальных ДСК-кривых соотношения q_s/q_{\max} варьируется от 0.2 до 1.2. Если параметр q_s соответствует тепловому потоку в начальной

точке эксперимента, то эта величина является постоянной (константой) для любого измерения и приравнивается к нулю в случае правильно настроенного (откалиброванного) термоанализатора. Данное замечание относится также к рисункам 3.8 (а), 3.10 (а) и 3.11 (а).

- (5) С. 86, таблицы 3.3 и 3.4. Таблицы содержат противоречивые данные. Так в таблице 3.3 приводятся значения температуры начала окисления μAl (99.1 % Al) $T_{\text{on}} = 830$ °С, однако в таблице 3.4 показано увеличение массы образца в температурном диапазоне 400–660 °С ($\Delta m = 0.4$ %). Данное замечание относится также к порошкам АСД-4 (98.5 % Al) $T_{\text{on}} = 800$ °С, а $\Delta m = 2.2$ %; AlB_2 (55.5/44.5) $T_{\text{on}} = 876$ °С, а $\Delta m = 1.3$ %; AlB_{12} (17.22/82.78) $T_{\text{on}} = 747$ °С, а $\Delta m = 0.6$ %.
- (6) С. 87, некорректная ссылка на рисунок 3.7 и таблицу 3.3. Приводится следующее утверждение: «УДП Alex начинает окисляться... Максимальная скорость тепловыделения на данной стадии составляет $Q_{\text{max}} = 14.6$ Вт/г при температуре 600 °С (см. рисунок 3.7, таблицу 3.3)». Однако на рисунке 3.7 (б) ДСК-кривая Alex (линия 3) при 600 °С имеет безразмерное значение 0.9 (т.е. высоте пика = 1.5–0.6 по шкале q_s/q_{max}); в таблице 3.3 приводится другой параметр $Q_p = 3.02$ кДж/г. Аналогичные некорректные ссылки имеются на с. 88 и с. 89, касающиеся порошков АСД-4 и аморфного бора.
- (7) С. 87, ошибка в анализе ДСК-кривой Alex на рисунке 3.7. В тексте имеется утверждение: «При температуре ~660 °С происходит эндотермическое плавление алюминия с резким увеличением массы образца Alex (~30 %)». При этом присутствует ссылка на рисунок 3.7, на котором ДСК-кривая имеет два экзотермических эффекта с экстремумами ≈ 600 °С и ≈ 800 °С, которые иллюстрируют два этапа окисления упомянутого порошка и соответствуют двум ступеням на ТГ- кривой. Эндотермический эффект (плавление Alex = 660 °С) на ДСК- кривой на рисунке 3.7 отсутствует. Кроме того, возникает вопрос, каким образом была определена величина увеличения массы на 30 % (в таблице 3.3

приводится значение $\Delta m = 29.5 \%$ в температурном диапазоне 400–660 °C), если согласно ссылке на рисунок 3.7 изменение соотношения $m/m_0 = 0.2$ (т.е. 1.6–1.4). Аналогичные ошибки имеются на с. 89 и с. 91 при описании ДСК-кривой аморфного бора (В) и порошка Al/Mg/B. В тексте упоминаются эндотермические эффекты, которые отсутствуют на термограммах.

(8) С. 90, ошибка в анализе ТГ-кривой Alex на рисунке 3.6 (а). В тексте утверждается: «Процесс окисления нанопорошка титана начинается при относительно низкой температуре ~ 100 °C (см. рисунок 3.6)...». Однако, согласно рисунку 3.6 (а) температура начала окисления равна ≈ 200 °C. Какая методика использовалась при определении значения этого параметра? Аналогичная ошибка допущена при анализе ТГ-кривой смесей порошков Ti/B (68.9/31.1). Согласно ссылке (в тексте) на рисунок 3.8, начало окисления данного порошка $T_{on} = 498$ °C, а порошка Ti/B (76.9/23.1) $T_{on} = 168$ °C. Те же значения указаны в таблице 3.3. Однако на рисунке 3.8 хорошо видно, что начало окисления Ti/B (68.9/31.1) происходит гораздо раньше ≈ 180 °C, т.е. смеси порошков Ti/B (68.9/31.1) и Ti/B (76.9/23.1) начинают окисляться при приблизительно равных температурах. Таким образом, сравнительный термический анализ порошков титана и его смесей с бором нельзя считать корректным.

Соискатель имеет 12 научных работ, опубликованных в отечественных и международных рецензируемых научных изданиях, входящих в список ВАК. Одна глава в иностранной монографии; семь материалов конференций в периодических изданиях, индексируемых базами Scopus и Web of Science, а также тридцать публикаций в сборниках материалов международных и всероссийских конференций, семинаров и симпозиумов.

Наиболее значимые научные работы по теме диссертации:

1. Коротких А. Г., **Сорокин И. В.**, Архипов В. А. Зажигание высокоэнергетического материала, содержащего ультрадисперсный порошок

Al/B // Химическая физика. – 2022. – Т. 41, № 3. – С. 41-48.

2. Коротких А. Г., **Сорокин И. В.** Влияние бора на параметры горения ВЭМ и окисление нанопорошков Al/B, Ti/B // Изв. вузов. Физика. – 2021. – Т. 64, № 4. – С. 3-8. (Korotkikh A. G., **Sorokin I. V.** Effect of boron on the combustion parameters of HEM and oxidation of Al/B and Ti/B nanopowders // Russian Physics Journal. – 2021. – Vol. 64, No. 4. – P. 567-573.).

3. Коротких А. Г., **Сорокин И. В.**, Слюсарский К. В., Архипов В. А. Зажигание борсодержащих высокоэнергетических материалов на основе окислителя и полимерного связующего // Журнал технической физики. 2021. – Т. 91, № 6. – С. 926-932. (Korotkikh A. G., Slyusarsky K. V., **Sorokin I. V.**, Arkhipov V. A. Ignition of boron-containing high-energy materials based on an oxidizer and polymer binder // Technical Physics. – 2021. – Vol. 66, No. 6. – P. 896-902.).

4. Архипов В. А., Золоторёв Н. Н., Коротких А. Г., Кузнецов В. Т., Матвиенко О. В., **Сорокин И. В.** Зажигание вращающихся образцов высокоэнергетических материалов лазерным излучением // Физика горения и взрыва. – 2021. – Т. 57, № 1. – С. 90-98. (Arkhipov V. A., Zolotorev N. N., Korotkikh A. G., Kuznetsov V. T., Matvienko O. V., **Sorokin I. V.** Ignition of Rotating Samples of High-Energy Materials by Laser Radiation // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2021. – Vol. 57, No. 1. – P. 83-90.).

5. Коротких А. Г., **Сорокин И. В.**, Селихова Е. А., Архипов В. А. Зажигание и горение смесевых твердых топлив на основе двойного окислителя и борсодержащих добавок // Химическая физика. – 2020. – Т. 39, № 7. – С. 32-40. (Korotkikh A. G., **Sorokin I. V.**, Selikhova E. A., Arkhipov V. A. Ignition and Combustion of Composite Solid Propellants Based on a Double Oxidizer and Boron-Based Additives // Russian Journal of Physical Chemistry B. – 2020. – Vol. 14, № 4. – P. 592-600.).

6. Коротких А. Г., Слюсарский К. В., **Сорокин И. В.** Кинетика термического окисления порошков Al, B, AlB₂ и AlB₁₂ // Химическая физика и мезоскопия. – 2020. – Т. 22, № 2. – С. 164-174.

7. Коротких А. Г., Архипов В. А., Слюсарский К. В., **Сорокин И. В.** Исследование зажигания высокоэнергетических материалов с бором и диборидами алюминия и титана // Физика горения и взрыва. – 2018. – Т. 54, № 3. – С. 109-115. (Korotkikh A. G., Slyusarsky K. V., **Sorokin I. V.**, Arkhipov V. A. Study of ignition of high-energy materials with boron and aluminum and titanium diborides // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2018. – Vol. 54, No. 3. – P. 350-356.).

8. Коротких А. Г., Архипов В. А., **Сорокин И. В.**, Селихова Е. А. Зажигание и горение высокоэнергетических материалов, содержащих алюминий, бор и диборид алюминия // Химическая физика и мезоскопия. – 2018. – Т. 20, № 1. – С. 5-14.

9. Коротких А. Г., Архипов В. А., Глотов О. Г., **Сорокин И. В.** Влияние добавок ультрадисперсного порошка металла на характеристики горения ВЭМ // Химическая физика и мезоскопия. – 2016. – Т. 18, № 2. – С. 179-186.

10. Korotkikh A. G., **Sorokin I. V.** Effect of Me/B-powder on the ignition of high-energy materials // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2021. – Vol. 46, No. 11. – P. 1709-1716.

11. Korotkikh A. G., **Sorokin I. V.**, Selikhova E. A., Arkhipov V. A. Effect of B, Fe, Ti, Cu nanopowders on the laser ignition of Al-based high-energy materials // Combustion and Flame. – 2020. – Vol. 222. – P. 103-110.

12. Korotkikh A. G., **Sorokin I. V.**, Selikhova E. A., Arkhipov V. A. Effect of boron and aluminum diboride on ignition of high-energy materials // Science and Technology of Energetic Materials. – 2019. – Vol. 80, No. 5. – P. 189-193.

На автореферат диссертации поступило 9 отзывов. Все отзывы положительные, из них восемь содержат замечания. Отзывы поступили от:

- доктора химических наук **Шмакова Андрея Геннадьевича**, заведующего лабораторией кинетики процессов горения ИХКГ СО РАН;
- кандидата технических наук **Лукашова Владимира Владимировича**, ведущего научного сотрудника Федерального государственного

бюджетного учреждения науки Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН);

- доктора физико-математических наук **Салганского Евгения Александровича**, ведущего научного сотрудника лаборатории горения в высокоскоростных потоках Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук;
- кандидата технических наук **Панченко Натальи Федоровны**, заместителя начальника отдела – начальника лаборатории Акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Алтай» (АО «ФНПЦ «Алтай»);
- доктора технических наук **Корепанова Михаила Александровича**, доцента, заведующего кафедрой «Ракетная техника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова;
- доктора технических наук **Трушлякова Валерия Ивановича**, профессора кафедры «Авиа- и ракетостроение» Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет»; руководителя ИНОЦ «Космическая экология»;
- доктора технических наук **Пивкиной Алевтины Николаевны**, заведующей лабораторией энергетических материалов Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (ФИЦ ХФ РАН), и кандидата технических наук **Муравьева Никиты Вадимовича**, ведущего научного сотрудника лаборатории энергетических материалов ФИЦ ХФ РАН.

- доктора технических наук *Гусейнова Ширина Латифовича*, лауреата премии Правительства РФ, заслуженного химика РФ, заместителя генерального директора по науке Государственного научного центра Российской Федерации Акционерного общества «Государственный Орден Трудового Красного Знамени Научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений» (ГНЦ РФ АО «ГНИИХТЭОС»);
- доктора технических наук *Яновского Леонида Самойловича*, профессора, член-корреспондента РАН, начальника отдела «Двигатели и химмотология» Государственного научного центра, Федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова»), и кандидата технических наук *Байкова Алексея Витальевича*, старшего научного сотрудника, начальника сектора теплофизики отдела «Двигатели и химмотология» ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

В отзывах на автореферат имеются следующие вопросы и замечания: (1) на стр. 18 в Таблице 2 представлены рассчитанные величины констант формальной кинетики зажигания высокоэнергетических материалов. Однако точность определения этих констант, например, энергии активации, в автореферате не указана. (*Шмаков А.Г.*); (2) в описании условий экспериментов перечисляются различные топливные композиции без пояснения, почему был сделан именно такой выбор; из описания не ясно, что такое «горячие точки» в области максимальных значений теплового потока лазерного луча? Почему они возникают? Какова интенсивность излучения на поверхности образца? Не указаны характеристики неравномерности энергии в лазерном пучке; за счет чего на облучаемой границе возникает конвекция и почему она, в конце концов, ни на что не влияет? Зачем проводилось численное моделирование одномерной тепловой задачи? В работе приведен широкий массив важных, уникальных

экспериментальных сведений, однако, ни обобщения закономерностей воспламенения, ни убедительной формулировки физических механизмов воспламенения в выводах не содержится. (*Лукашов В.В.*); (3) термоаналитическим методом изучены основные закономерности термического окисления порошков металлического горючего и разложения компонентов образцов при постоянной скорости нагрева, равной 10 К/мин. А исследование характеристик зажигания составов производилось при иницировании лазером. В этом случае скорость нагрева образцов ВЭМ была гораздо выше. Оценивалась ли применимость результатов, полученных при разных условиях нагрева? Автором принято допущение, что теплофизические параметры (плотность, удельная теплоемкость, коэффициент теплопроводности) твердотопливной композиции в модели приняты постоянными и не зависящими от компонентного состава образца. Следует пояснить границы применимости модели. (*Салганский Е.А.*); (4) каким способом смешением или прессованием изготавливались образцы ВЭМ для экспериментальных исследований. Какая технологичность составов при использовании порошков высокой дисперсности (УДП, Alex, микроразмерного порошка AlB_{12}). Определялась ли химическая совместимость биметаллических горючих с основными компонентами ВЭМ. Метилполивинилтетразол является полимером. (*Панченко Н.Ф.*); на стр. 17 отмечено «появление вспышки на поверхности образца ВЭМ происходит в области максимальных значений теплового потока лазерного луча («горячих» точек)...» Имеется в виду, что лазерный луч дает неоднородный тепловой поток? На рис. 2 приведено сравнение расчетных и экспериментальных данных по времени задержки зажигания от плотности теплового потока, при этом отмечается, что значения кинетических параметров зажигания определены по результатам эксперимента. Однако, в табл. 2 значения кинетических параметров зажигания приведены для иных составов, нежели на рис. 2. В результате тяжело оценить почему, например, на рис. 2, б для разных составов данные практически совпадают (*Корепанов М.А.*); к основному замечанию можно отнести отсутствие в заключении сформулированных общих закономерностей

зажигания металлизированных высокоэнергетических материалов сложного состава и рекомендаций по вариации состава топлив, указанных в цели диссертационного исследования. Сформулированные задачи исследования не раскрывают заявленной цели диссертационного исследования. В тексте автореферата не отражены некоторые визуализированные результаты экспериментальных исследований, соответствующие описанным результатам, в частности, относящиеся к положению, выносимому на защиту (п. 4). (*Трушляков В.И.*); в таблице 1 автореферата приведены измеренные значения параметров окисления металлов и бора, полученные при нагревании на воздухе. Следует указать погрешность проведенных измерений. В тексте автореферата указано, что скорость тепловыделения при окислении аморфного бора составляет 27.7 Вт/г при 710 °С. Следует указать измеренную величину удельной теплоты реакций в Дж/г. Исходя из результатов проведенных масштабных экспериментальных исследований, в тексте автореферата не приведен алгоритм, по которому возможна предварительная разработка рецептуры высокоэнергетических композиций с заранее заданными характеристиками зажигания. (*Пивкина А.Н., Муравьев Н.В.*); из материалов реферата неясно насколько однороден поток лазерного излучения, применявшегося для зажигания топлива, в радиальном направлении. Остается неясным способно лазерное излучение вызывать испарение материала топлива, что может вносить свои особенности в процесс зажигания лазером. Описывая проведенные исследования, автор не указывает применительно к каким видам реактивных двигателей, эти исследования проводятся. В рассмотренных автором математических моделях процесса зажигания ЭМ, он ограничился простейшей схемой процесса, не учитывая неоднородностей присущих смесевому топливу (*Яновский Л.С., Байков А.В.*).

В положительных отзывах оппонентов имеются следующие замечания и вопросы:

Нурмухаметов Д.Р.:

- В работе не обуславливается выбор в качестве источника зажигания/тепла излучение CO₂-лазера. Вы в своей работе для практических применений предлагаете использовать лазерное излучение в качестве инициатора зажигания высокоэнергетических материалов? Будет ли отличие полученных Вами результатов от результатов с применением излучения не «лазерной» природы, например, мощной световой вспышкой со спектром излучения близким к солнечному?
- В описании методики эксперимента (п.4.2) не совсем понятно лазерное излучение на образец имело непрерывный или импульсный характер? Сообщается, что «..время экспозиции составляло ~3 мс», из этого можно предположить, что излучение имело импульсный характер.
- Что принималось в математической модели за критерий зажигания, а в экспериментальной части за момент зажигания?
- В главе 4 следовало бы пояснить, продолжался ли процесс горения ВЭМ после отключения CO₂-лазера, и что происходило с образцом ВЭМ при затухании пламени? Наблюдалось ли свечение на поверхности образца ВЭМ без формирования вспышки и зоны пламени при относительно коротких импульсах? Также практический интерес представляют измеренные данные о спектре свечения во всех случаях: без зажигания, с зажиганием, поверхность образца, пламя. Проводились ли такие измерения?
- Производился ли анализ газообразных продуктов реакции? Каков их состав? На стр. 131 указывается, что «...газообразные продукты образуют светящуюся струю диаметром ~3 мм вдоль оси лазерного луча...». Существует ли возможность взаимодействия лазерного излучения с газообразными продуктами, приводящего к появлению свечения. При непрерывном излучении учитывался ли эффект экранирования газообразными продуктами реакции?

- В описании механизма зажигания ВЭМ следовало бы пояснить метод измерения скорости распространения зоны пламени.

Ягодников Д. А.:

- Обзор литературы содержит значительное количество работ, которые не имеют непосредственного отношения к цели диссертации. А именно, подробно рассматривается состав твердых топлив и технология получения энергетических добавок, что, во-первых, относится к базовым знаниям, а, во-вторых, никак не связывается далее с установлением общих закономерностей зажигания металлизированных высокоэнергетических материалов.
- Представленные в главе 2 результаты по оптимизации состава ВЭМ на основании термодинамического расчета в ПК «Терга» не представляют научной ценности. Автор не дает пояснений характера полученных зависимостей для различных составов ВЭМ.
- Из текста диссертации не ясно, в чем заключается новизна предлагаемой математической модели, а также на основании чего становится возможным использование модели зажигания гомогенного топлива Виллюнова В. Н. для гетерогенных составов.
- В формулировке научной новизны работы (п. 4) говорится о снижении времени задержки воспламенения для ВЭМ с AlB_2 и AlB_{12} по сравнению с ВЭМ, содержащим алюминий. При этом не указано, что высокоэнергетические добавки имеют разную дисперсность (алюминий – микродисперсный, а бориды – ультрадисперсные).

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

«химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается компетентностью оппонентов и сотрудников ведущей организации в области зажигания и горения конденсированных систем, 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:

- экспериментально *изучено* влияние биметаллического горючего на характеристики процесса зажигания твердотопливных композиций. *Определены* основные параметры окисления дисперсных металлических горючих, временные задержки зажигания варьируемого компонентного состава ВЭМ в зависимости от плотности теплового потока. *Показано*, что изменение компонентного состава и дисперсности биметаллического горючего позволяет существенно модифицировать характеристики зажигания ВЭМ – время задержки зажигания, температуру зажигания и плотность энергии зажигания от внешнего источника.

- в термоаналитическом исследовании при постоянной скорости нагрева 10 °С/мин *определены* значения характерных температур начала и интенсивного окисления, фазовых переходов, скорости выделения/поглощения теплоты экзо- и эндотермических реакций и скорости изменения массы металлических горючих при накоплении оксидов на основе смесей УДП алюминия, железа, никеля, титана с бором и характеристики термического разложения металлизированных твердотопливных композиций, демонстрирующие повышенную реакционную способность смеси УДП Alex/B, микроразмерного порошка AlB_{12} и ВЭМ, содержащего перхлорат аммония, бутадиеновый каучук и смесь УДП 13.7%Alex/2%Fe.

- в исследовании лазерного зажигания ВЭМ *установлено*, что введение ультрадисперсных биметаллических горючих на основе Al/B, Al/Fe и Ti/B в ВЭМ на основе перхлората аммония и бутадиенового каучука значительно снижает времена задержки зажигания. Для ВЭМ на основе перхлората и нитрата аммония и тетраэзоляного каучука наиболее эффективными биметаллическими горючими с точки зрения уменьшения времени задержки зажигания являются бориды алюминия AlB_2 и AlB_{12} .

- с применением высокоскоростной визуализации и тепловизионной съемки *изучены* физическая картина реагирования и развитие пламенных процессов на поверхности ВЭМ при воздействии монохроматического излучения с постоянной плотностью теплового потока. *Изучено* влияние компонентного состава и дисперсности металлического горючего на времена инертного прогрева исследуемых топлив и оттока продуктов газификации с частицами металла с поверхности реакционного слоя, скорость распространения зоны пламени, а также на время задержки появления пламени ВЭМ. Показано, что длина зоны пламени ВЭМ на основе перхлората аммония и бутадиенового каучука зависит от реакционной способности и размеров частиц металлов. Сформулированы физические представления о механизме и стадиях процесса зажигания исследуемых составов ВЭМ.

Теоретическая и практическая значимость заключается в том, что полученные результаты экспериментального исследования процессов термического разложения и зажигания ВЭМ, а также окисления энергоемких металлических горючих могут быть использованы для развития теории горения гетерогенных конденсированных систем и для решения ряда практических задач, связанных с оценкой взрывобезопасности, расчетом переходных процессов в энергоустановках различного назначения (ракетно-космические технологии, средства вооружения, пиротехника, газогенераторы, двигатели на твердом и пастообразном топливах) и разработкой лазерных систем инициирования. Установленные закономерности и характеристики окисления металлических горючих, зажигания ВЭМ дают основу для расширения

фундаментальных знаний о горении твердотопливных композиций, содержащих биметаллические порошки, и для решения математических задач, моделирующих нестационарные процессы зажигания и горения конденсированных систем. Установленные зависимости времени задержки зажигания от плотности теплового потока и характерные температуры окисления порошков металлов позволяют определить оптимальные характеристики зажигания.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что: *сделанные выводы и полученные научные результаты* основаны на использовании классических экспериментальных методов термического анализа и измерения времени задержки зажигания, удовлетворительной повторяемости экспериментальных данных, качественном и количественном соответствии с результатами, полученными другими авторами в пересекающихся областях исследований; на применении классических методов статистического анализа экспериментальных данных и обработки данных с помощью высокоэффективных вычислительных алгоритмов, позволяющих получать детальные и точные зависимости, пригодные для их сопоставления с экспериментальными и теоретическими данными других авторов.

Личный вклад соискателя состоит в сборе и анализе опубликованных результатов исследования по применению металлических горючих в ВЭМ и исследованию их характеристик зажигания и горения; проведении термоаналитического исследования порошков металлов и экспериментов по зажиганию металлизированных ВЭМ; обработке экспериментальных данных и определении зависимостей; проведении расчетов характеристик зажигания и горения ВЭМ; анализе и обобщении полученных в работе результатов; формулировке защищаемых положений и выводов. Подготовка публикаций по теме диссертации проводилась совместно с научным руководителем и 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 «химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» (п. 7. «Закономерности и механизмы распространения, структура, параметры и устойчивость волн горения, детонации, взрывных и ударных волн; 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»). Соискатель Сорокин И.В. 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 техническим замечаниями и пожеланиями, по научным вопросам были даны аргументированные и четкие ответы.

На заседании 12 октября 2022 г. диссертационный совет постановил: за решение научной задачи связанной с определением характеристик зажигания высокоэнергетических материалов, содержащих биметаллические энергоёмкие горючие, присудить **Сорокину Ивану Викторовичу** учёную степень кандидата 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

14.10.2022 г.

