УТВЕРЖДАЮ
И.о. проректора по науке стратегическим проектам
Национального исследовательского Томского политехнического университета
_____ Степанов И.Б.
«15» 05 2023 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Диссертация ***«Термическое разложение отходов углеобогащения и низкокалорийных топлив при нагреве световым потоком высокой интенсивности»*** по специальности ***1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества*** выполнена в ***Исследовательской школе физики высокоэнергетических процессов федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»***.

В период подготовки диссертации соискатель ***Егоров Роман Игоревич*** 1980 года рождения работал в ***федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Исследовательская школа физики высокоэнергетических процессов научным сотрудником***.

В 2007 г. защитил ***диссертацию кандидата физико-математических наук «Топологическая структура световых полей с поляризационными сингулярностями»*** в ***Институте Физики НАН Украины*** по специальности ***Оптика, лазерная физика***.

Диплом кандидата физико-математических наук по направлению «Оптика, лазерная физика» ДК № 044153, выданный на основании решения ***Высшей аттестационной комиссии Украины*** 17 января 2008 г.

Научный консультант: ***доктор физико-математических наук, профессор Стрижак Павел Александрович, основное место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Инженерная школа энергетики, НОЦ И.Н. Бутакова, профессор.***

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Общая характеристика работы

Диссертация Егорова Р.И. представляет законченную научно-квалификационную работу, в которой изложены результаты экспериментальных и теоретических исследований, совокупность которых можно квалифицировать как новые научные достижения в области термического разложения отходов обогащения углей и горения низкокалорийных топлив.

Полученные экспериментальные и теоретические результаты и сформулированные выводы обладают единством изложения в рамках тематики выполненных исследований. Оформление и стиль написания диссертации отвечают требованиям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Актуальность темы исследования

Проблема использования отходов углеобогащения и низкокалорийных ископаемых топлив (НИТ) в качестве энергетических ресурсов представляет интерес в связи с удорожанием традиционных ресурсов, энергетическими кризисами и геополитическими конфликтами. На протяжении многих десятилетий разработки угольных месторождений в отвалах накоплены сотни миллионов тонн мелкодисперсных горючих отходов обогащения углей. Эти отходы характеризуются широкой доступностью, высокой зольностью (50–60 %масс.), низкими по сравнению с угольным концентратом теплотой сгорания и реакционной способностью. Отвалы занимают значительные территории, служат источником пылеобразования, представляют объекты повышенной пожарной опасности вследствие горючести пыли и высокого содержания в отходах высокомолекулярных углеводородов (до 30 %масс.), которые даже при солнечном нагреве выделяют легко воспламеняемые летучие вещества (в первую очередь, метан). Разработка эффективных методов утилизации таких отходов позволит существенно улучшить экологическую обстановку в регионах, а также даст промышленности дополнительное сырье, способное выступить в качестве промышленного топлива и удовлетворить потребности химической промышленности в исходных компонентах для синтеза высокомолекулярных соединений. Твердые НИТ (бурый уголь, торф) обладают свойствами, близкими к свойствам отходов углеобогащения (пониженная теплотворная способность, высокая зольность), что также позволит применить разработанные подходы для расширения использования таких топлив в промышленности.

Попытки использования фильтр-кеков, шламов и прочих углеродсодержащих отходов, а также торфов и бурых углей в промышленном

производстве тепловой энергии предпринимаются в течение длительного периода времени. Во второй половине XX века выделены основные факторы, сдерживающие эффективное сжигание таких отходов. Показано, что данный тип топлива характеризуется высокими временами задержки зажигания и низкой калорийностью, из-за чего попытки его массового использования сопряжены с высокими капитальными затратами на модификацию топочных агрегатов. В последние годы выделенная проблема становится еще более актуальной в связи с исчерпанием угольных месторождений в странах Европы, Китае и России. Сжигание отходов углеобогащения и низкокалорийных топлив в виде водоугольных смесей (ВУС) позволяет улучшить экологические показатели горения вместе с повышением эксплуатационных характеристик процессов хранения и транспортировки топлива. Горение таких смесей достаточно полно исследовано в области пониженных температур (до 700 °С). Наиболее эффективный (с учетом довольно низкой реакционной способности смесей) высокотемпературный режим рассмотрен недостаточно глубоко вследствие необходимости дополнительных затрат на разогрев топлива (совместное сжигание с высокосортным топливом, применение плазменных горелок и кислородного дутья). Методы термохимической переработки (пиролиз, газификация) с применением традиционных автотермических технологий также не получили широкого распространения вследствие низкой калорийности топлива, не позволяющей конвертировать значительную массу за счет сжигания малой порции. Таким образом, пока не сформированы обоснованные представления о том, какие физические механизмы наиболее эффективны при использовании низкокалорийного топлива в энергетике. Использование сторонних источников энергии для ускорения химических реакций в топливе на разных этапах горения смесей, приготовленных из низкокалорийного горючего, является задачей многопараметрической. Известные попытки использования аллотермических процессов для переработки углеродсодержащего сырья с низкой теплотой сгорания в промышленно применимое состояние также далеки от масштабного практического применения. Они показывают, что наиболее перспективным является использование экстремального нагрева, позволяющего получать генераторный газ с максимальной калорийностью наравне с высокой производительностью таких систем. Тематика исследований соответствует приоритетам Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (указ Президента РФ № 642 от 1 декабря 2016 г.): «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии» и «Возможность эффективного ответа российского общества на

большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий».

Связь работы с государственными программами и НИР. Диссертационные исследования выполнены в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета: проект ВИУ-НУ-44-2014 «Постдок в Томском политехническом университете», проект «Разработка оптимизированных методик конверсии горючих промышленных отходов для создания альтернативных топлив» (ВИУ-ИШФВП-299/2018), проект «Разработка экологически выгодных аллотермических методик утилизации горючих отходов углеобогащения с попутной выработкой тепловой энергии» (ВИУ-ИШФВП-197/2019), а также в рамках проекта Российского фонда фундаментальных исследований «Оценка жизненного цикла снижения выбросов CO_2 путем энергоэффективного пиролиза и газификации композиционной биомассы» (№ 19-53-80019) и программ госзадания «Наука» проект № 1.0031.ГЗБ.2020 и проект № 2.0001.ГЗБ.2023.

Личный вклад автора состоит в выборе направления исследований, формулировке задач, определении необходимых условий проведения экспериментов, выделении ключевых параметров, разработке алгоритмов решения поставленных задач, решении крупных научно-технических задач в направлении термохимической конверсии НИТ при мощном световом нагреве. Приведенные результаты экспериментальных исследований и математического моделирования получены в соавторстве с коллегами из Лаборатории тепломассопереноса ТПУ.

Достоверность полученных результатов и **обоснованность положений работы** подтверждаются сопоставлением результатов исследований в предельных случаях с данными других авторов. Применение высокоточных средств измерений, а также корректная организация экспериментов дает обоснованную уверенность в полученных числовых результатах. Удовлетворительная корреляция результатов численного моделирования с экспериментальными данными является дополнительным критерием их достоверности.

Научная новизна диссертационной работы состоит в следующем:

1. Разработан подход (фундаментальные основы методики, основные зависимости, границы применимости, методология оценки затрат энергии) к детальному изучению закономерностей и характеристик физико-химических процессов при аллотермическом разложении топливных смесей, приготовленных из отходов углеобогащения, а также НИТ, под действием интенсивного светового потока.

2. Обоснован высокий потенциал практического применения неорганических примесей для улучшения свойств топливных смесей, приготовленных из отходов. Выполненные расчеты показали значительный положительный экологический эффект добавления к топливным смесям частиц алюминия, железа и меди, а также известняка. Установлены закономерности зажигания и горения ВУС с неорганическими примесями.

3. Получены новые представления о физике термического разложения и горения, основных закономерностях протекания термохимических процессов в низкокалорийных ископаемых топливах под действием тепловых потоков, значительно отличающиеся от протекающих процессов при их сжигании в камерах энергетических установок и реакторах (более 300 Вт/см^2).

4. Получены новые данные о закономерностях взаимодействия лазерного излучения с жидкими отходами обогащения углей в ходе распыления смесей из отходов углеобогащения с использованием лазерных импульсов. Оценен потенциал и границы применимости лазерного распыления к задаче зажигания топливных смесей.

5. Сформированы новые знания о закономерностях протекания термического разложения топливных смесей из отходов по результатам математического моделирования и экспериментальных исследований.

Теоретическая значимость работы. Сформулированы научные основы теории прогноза закономерностей и характеристик физико-химических процессов, протекающих при синтезе компонентов генераторного газа под действием мощного светового потока. Адаптирована физическая и математическая модели термического разложения смесей из отходов углеобогащения для случая нагрева топлива внешним источником высокой интенсивности, связывающая параметры топливной смеси, режима нагрева и состава конечных продуктов процесса.

Установлены закономерности теплопереноса в слое топлива в ходе аллотермического разложения смесей из отходов углеобогащения, а также проанализированы основные макроскопические характеристики данного процесса, которые не могут быть определены экспериментально.

Показаны основные закономерности динамики газогенерации в области светового нагрева и вне неосвещенной зоны в привязке к кинетике доминирующих химических реакций, протекающих в топливе. Показаны границы применимости предложенного подхода к свето-индуцированному пиролизу отходов обогащения углей.

Практическая значимость работы. Предложенные подходы, разработанные методики и модели, выявленные закономерности позволили сформировать общие принципы переработки отходов углеобогащения и НИТ

с использованием интенсивного нагрева под действием сфокусированного солнечного излучения, а также света от искусственных источников.

Оценка экологического и энергетического эффектов неорганических примесей в условиях зажигания и горения ВУС позволила предложить новые способы повышения эффективности использования топлив по характеристикам: температура горения, концентрации выбросов, времена задержки зажигания, предельные тепловые потоки.

Разработаны физические и математические модели свето-индуцированного пиролиза, позволяющие прогнозировать развитие газогенерации в различных условиях с учетом свойств топлива.

Предложенные в диссертационной работе подходы, выявленные закономерности, разработанные методики исследований (в частности методики «настольного» эксперимента) позволили сформировать общие подходы к переработке отходов углеобогащения и НИТ с использованием сфокусированного солнечного света.

Апробация работы. Основные результаты диссертационного исследования представлялись на конференциях, семинарах и симпозиумах:

1. «Thermophysical basis of energy technologies 2015» (Томск, 2015).
2. «Heat and mass transfer in the system of thermal modes of energy - technical and technological equipment, HMTTSC 2016» (Томск, 2016).
3. «Nanoworkshop 2016» (Томск, 2016), «Совершенствование энергетических систем и теплоэнергетических комплексов» (Саратов, 2018).
4. «XXII Международный симпозиум имени академика М.А. Усова» (Томск, 2018).
5. «Энерго-ресурсоэффективность в интересах устойчивого развития» (Томск, 2018).
6. «Проблемы геологии и освоения недр» (Томск, 2018).
7. III Всероссийская научная конференция «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2018).
8. X Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2018).
9. V Всероссийской научной конференции «Теплофизика и физическая гидродинамика» (Ялта, 2019).
10. XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2021).

Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем. Материалы диссертационной работы опубликованы в 25 научных трудах, из них 2 в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ (Химия твердого топлива, Кокс и Химия), 20 в зарубежных изданиях, индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science

(Fuel, Applied Thermal Engineering, Energy, Renewable Energy, Fuel Processing Technology, Energy&Fuels), входящих в первый и второй квартили Scopus и WoS, 3 в сборниках конференций.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

В рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК:

1. А.С. Зайцев. Светоиндуцированная газификация топливных композиций, приготовленных из отходов углепереработки / А.С. Зайцев, П.П. Ткаченко, М.В. Белоногов, **Р.И. Егоров** // Кокс и Химия. – 2018. – Т. 7. – С. 43-51. – **Авторский вклад**: 50%.
2. А.С. Зайцев. Газификация водоугольных композиций лазерными импульсами различной интенсивности / А.С. Зайцев, **Р.И. Егоров**, П.П. Ткаченко, М.В. Белоногов // Химия твердого топлива. – 2019. – Т. 1. – С. 54-60. – **Авторский вклад**: 50%.

Научные издания, индексируемые в базах данных Scopus и Web of Science (Q1: 16, Q2: 4):

3. K.Yu. Vershinina. The ignition parameters of the coal-water slurry droplets at the different methods of injection into the hot oxidant flow / K.Yu. Vershinina, **R.I. Egorov**, P.A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 107. – P. 10-20. – ***Авторский вклад***: 30%.
4. **R.I. Iegorov.** The effect of the petrochemicals at the ignition of the coal-water slurry droplet / **R.I. Iegorov**, T.R. Valliulin, P.A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. – 2016. – V. 106. – P. 351-353. – ***Авторский вклад***: 80%.
5. T.R. Valiullin. Effect of a small amount of aluminum powder on the combustion of the waste-derived coal–water slurry / T.R. Valiullin, **R.I. Egorov**, P.A. Strizhak // Energy and Fuels. – 2016. – V. 31. – P. 1044-1046. – ***Авторский вклад***: 75%
6. T.R. Valiullin. Perspectives of the use of rapeseed oil for the doping of waste-based industrial fuel / T.R. Valiullin, P.A. Strizhak, **R.I. Egorov** // Energy and Fuels. – 2017. – V. 31, No. 9. – P. 10116-10120. – ***Авторский вклад***: 75%.
7. **R.I. Egorov.** The light-induced gasification of waste-derived fuel / **R.I. Egorov**, P.A. Strizhak // Fuel. – 2017. – V. 197. – P. 28-30. – ***Авторский вклад***: 80%.
8. D.V. Antonov. Effect of macroscopic porosity onto the ignition of the waste-derived fuel droplets / D.V. Antonov, T.R. Valiullin, **R.I. Iegorov**, P.A. Strizhak // Energy. – 2017. – V. 119. – P. 1152-1158. – ***Авторский вклад***: 60%.
9. T.R. Valiullin. Combustion of the waste-derived fuel compositions metallized by aluminium powder / T.R. Valiullin, **R.I. Egorov.**, P.A. Strizhak // Combustion and Flame. – 2017. – V. 182. – P. 14-19. – ***Авторский вклад***: 75%.
10. **R.I. Iegorov.** Combustion of the coal-water slurry doped by combustible and non-combustible micro-particles / **R.I. Iegorov**, T.R. Valiullin, P.A. Strizhak // Applied Thermal Engineering. – 2017. – V. 113. – P. 1021-1023. – ***Авторский вклад***: 75%.

11. **R.I. Egorov.** Activation of the fuels with low reactivity using the high-power laser pulses / **R.I. Egorov**, A.S. Zaitsev, E.A. Salgansky // Energies. – 2018. – V. 11, No. 11. – P. 3167. – ***Авторский вклад***: 75%.
12. **R.I. Egorov.** The ignition dynamics of the water-filled fuel compositions / **R.I. Egorov**, D.V. Antonov, T.R. Valiullin, P.A. Strizhak // Fuel Processing Technology. – 2018. – V. 174. – P. 26-32. – ***Авторский вклад***: 60%.
13. A.S. Zaitsev. Light-induced gasification of the coal-processing waste: possible products and regimes / A.S. Zaitsev, **R.I. Egorov**, P.A. Strizhak // Fuel. – 2018. – V. 212. – P. 347-352. – ***Авторский вклад***: 75%.
14. **R.I. Egorov.** Energetic and ecological effect of small amount of metalline powders used for doping waste-derived fuels / **R.I. Egorov**, T.R. Valiullin, P.A. Strizhak // Combustion and Flame. – 2018. – V. 193. – P. 335-343. – ***Авторский вклад***: 75%.
15. **R.I. Egorov.** Efficiency of different heat exchange mechanisms for ignition of coal-water compositions / **R.I. Egorov**, R.I. Taburchinov, A.S. Zaitsev // Energy and Fuels. – 2019. – V. 33, No. 8. – P. 7830-7834. – ***Авторский вклад***: 50%.
16. Z. Yang. Recent advances in co-thermochemical conversions of biomass with fossil fuels focusing on the synergistic effects / Z. Yang, Y. Wu, Z. Zhang, H. Li, X. Li, X. Gao, **R.I. Egorov**, P.A. Strizhak // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2019. – V. 103. – P. 384-398. – ***Авторский вклад***: 15%.
17. **R.I. Egorov.** Intensity dependent features of the light-induced gasification of the waste-derived coal-water compositions / **R.I. Egorov**, A.S. Zaitsev, P.A. Strizhak, H. Li, X. Gao // Renewable Energy. – 2020. – V. 146. – P. 1667-1675. – ***Авторский вклад***: 60%.
18. R.I. Taburchinov. Effect of the addition of petrochemicals onto the atomization and ignition of the coal-water slurry prepared from the wastes / R.I. Taburchinov, M.V. Belonogov, **R.I. Egorov** // Applied Sciences. – 2020. – V. 10. – Article no. 8574. – ***Авторский вклад***: 50%.
19. **R.I. Egorov.** The propagation and ignition of the finely dispersed coal-water aerosol / **R.I. Egorov**, P.P. Tkachenko, R.I. Taburchinov, A.O. Chulkov // Fuel. – 2020. – V. 263. – Article no. 116767. – ***Авторский вклад***: 50%.
20. A.S. Zaitsev. Allothermal gasification of peat and lignite by a focused light flow / A.S. Zaitsev, R.I. Taburchinov, I.P. Ozerova, A.O. Pereira, **R.I. Egorov** // Applied Sciences. – V. 10, No. 8. – Article no. 2640. – ***Авторский вклад***: 50%.
21. M.V. Belonogov. Effect of the high-power electromagnetic pulses on the reactivity of the coal-water slurry in hot environment / M.V. Belonogov, R.I. Taburchinov, **R.I. Egorov** // Chinese Journal of Chemical Engineering. – 2020. – V. 28, No. 12. – P. 3145-3151. – **Авторский вклад**: 60%.
22. **R.I. Egorov.** The numerical study of allothermal gasification of the peat by the focused light flow / **R.I. Egorov**, R.I. Taburchinov // Applied Thermal Engineering. – 2021. – V.195. – №117253. – **Авторский вклад**: 50%.

Авторский вклад Егорова Р.И. состоял в формулировке темы работы, организации проведения исследований, обсуждении и подготовке результатов к публикации, участии в подготовке текста работ, написании английского

текста полностью (для публикаций в иностранных журналах), подготовке ответов на рецензии и соответствующая корректировка текста – в среднем не менее 60 %.

Соответствие содержания диссертации избранной специальности

Диссертация является завершенной научно-квалификационной работой и соответствует паспорту специальности 1.3.17 - Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества:

Соответствует следующим пунктам паспорта специальности:

1. Поведение веществ и структурно-фазовые переходы в экстремальных условиях – в электрических и магнитных полях, в условиях статического и динамического сжатия, в полях лазерного излучения, в плазме и в гравитационных полях, при сверхнизких температурах и в других условиях.

4. 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;

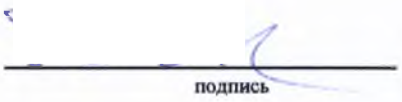
5. Процессы аналоги горения, детонации и взрыва; взаимодействие волн горения и взрывчатого превращения со средой, объектами и веществами; явления, порождаемые горением и взрывчатым превращением; процессы горения и взрывчатого превращения в устройствах и аппаратах для производства энергии, работы, получения веществ и продуктов; управление процессами горения и взрывчатого превращения.

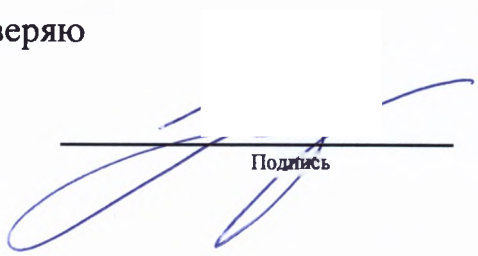
Диссертация ***«Термическое разложение отходов углеобогащения и низкокалорийных топлив при нагреве световым потоком высокой интенсивности» Егорова Романа Игоревича*** рекомендуется к защите на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности ***1.3.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества***.

Заключение принято на расширенном заседании ***Теплоэнергетической секции Научно-технического совета Инженерной школы энергетики с привлечением ведущих специалистов Исследовательской школы физики высокоэнергетических процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».***

Присутствовало на заседании 12 чел. из 16 членов совета, а также 2 дополнительных введенных внешних специалиста. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 4 от 17 апреля 2023 г.
Результаты голосования: Единогласно «за», «против» – нет, «воздержались» – нет.

Председатель Теплоэнергетической
секции Научно-технического совета
Инженерной школы энергетики,
Кузнецов Гений Владимирович,
д.ф.-м.н., профессор
научно-образовательного центра
И.Н. Бутакова Инженерной школы
Энергетики



Секретарь заседания
Филимонова Светлана Владиславовна,
секретарь Научно-технического совета,
Инженерной школы энергетики

Подписи Кузнецова Г.В. и Филимоновой С.В. заверяю
Ученый секретарь Ученого совета ТПУ
Кулинич Екатерина Александровна