

С И Б И Р С К И Й
Ф Е Д Е Р А Л Ь Н Ы Й
У Н И В Е Р С И Т Е Т | S I B E R I A N
F E D E R A L
U N I V E R S I T Y

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Сибирский федеральный университет»

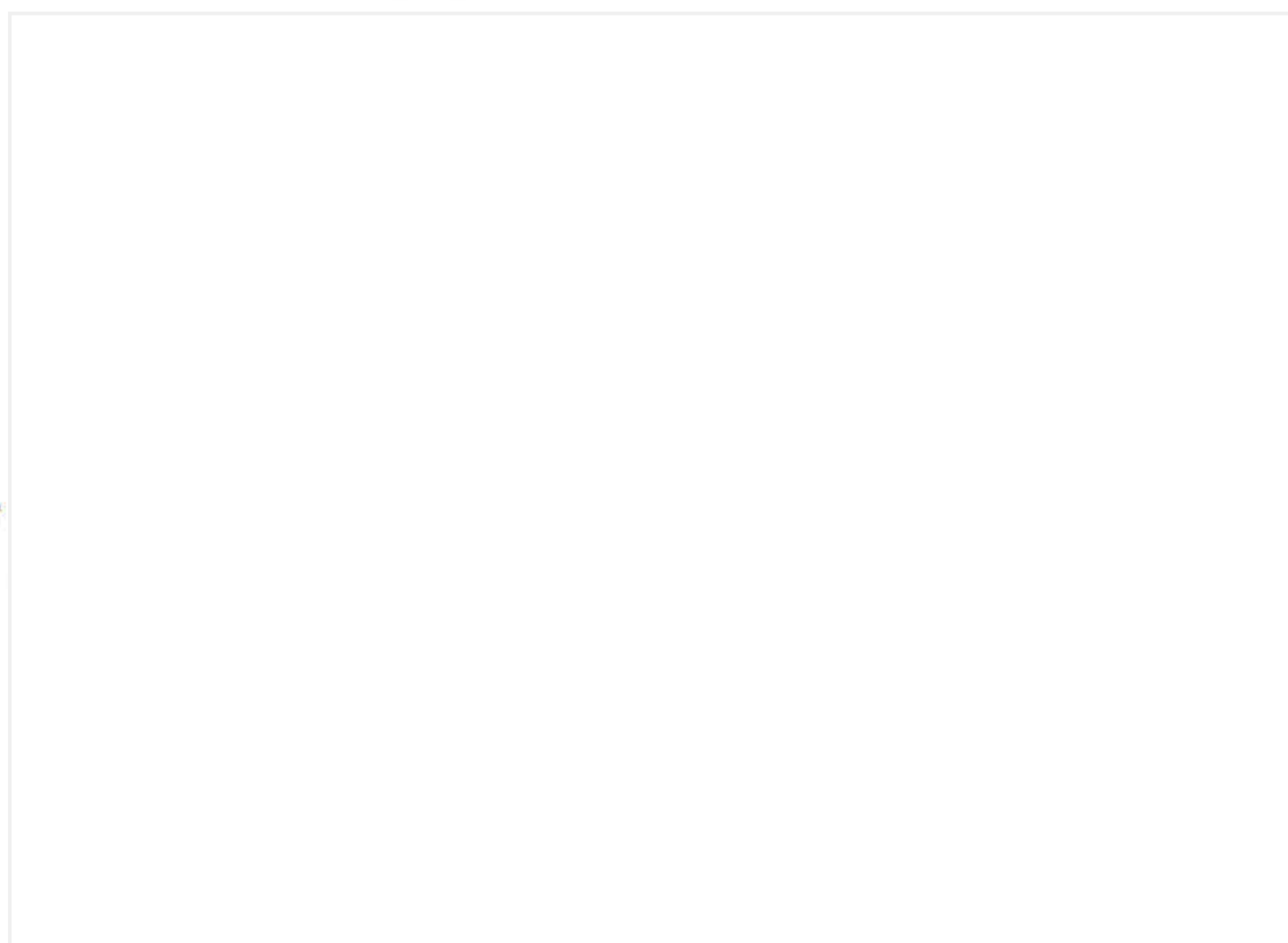
660041, Красноярский край,
г. Красноярск, проспект Свободный, д. 79
телефон: (391) 244-82-13, тел./факс: (391) 244-86-25
<http://www.sfu-kras.ru>, e-mail: office@sfu-kras.ru

ОКПО 02067876; ОГРН 1022402137460;
ИНН/КПП 2463011853/246301001

04.05.2022

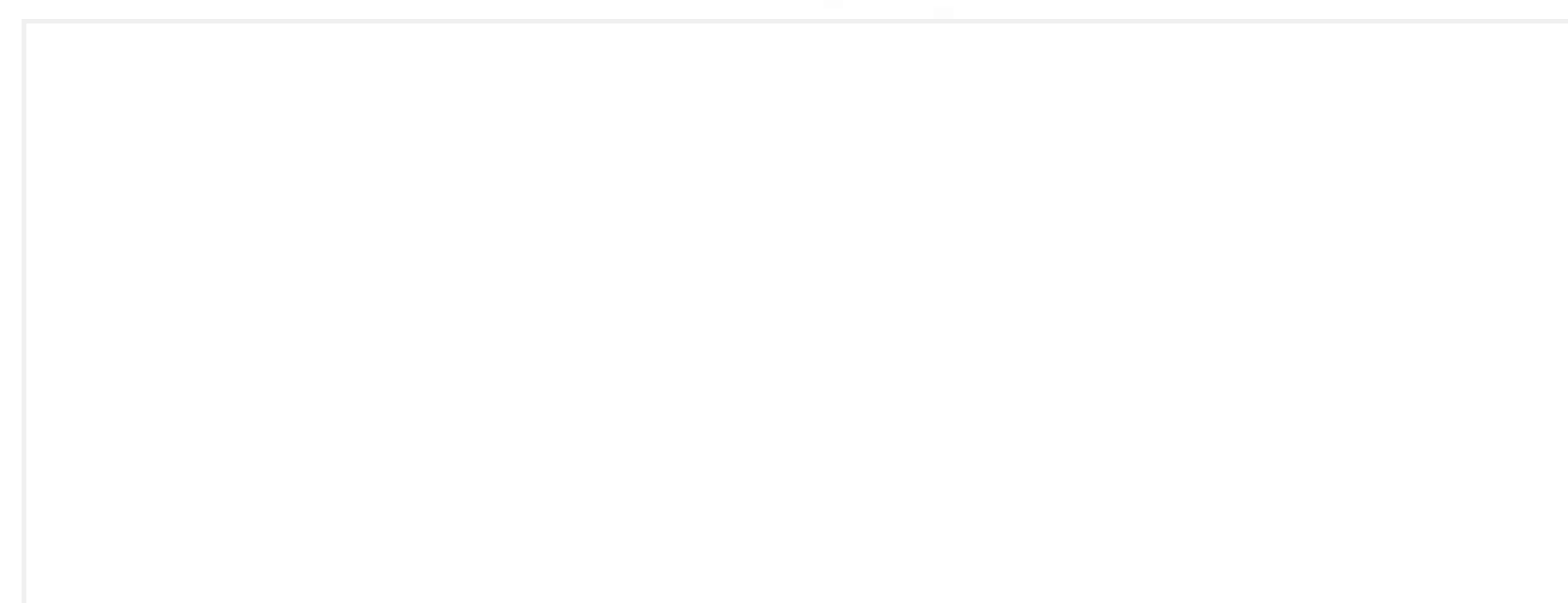
№ _____

на № _____ от _____



работе

Гуц Денис Сергеевич



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Сыродоя Семена Владимировича «Тепломассоперенос при воспламенении частиц перспективных композиционных топлив на основе угля» по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника на соискание ученой степени доктора технических наук

Актуальность, объект и предмет исследований обусловлены проблемой поиска ресурсосберегающих и экологически безопасных технологий сжигания топлива в виде водотопливных смесей в промышленных энергетических установках и тепловых электрических станциях. В значительной степени эффективность сжигания зависит от качества и физических свойств топливной смеси, которые в существенной мере определяются процессом их получения, что подтверждается, например, результатами, полученными в Сибирском федеральном университете, ИТ СО РАН, где ведутся работы по исследованию и внедрению новых видов композиционных топлив. Направленность работы определяется приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники и перечнем критических технологий РФ (Указ Президента РФ от 07.07.2011 г. № 899 в редакции Указа Президента РФ от 16.12.2015 г. № 623): «Рациональное природопользование», «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика» в соответствии критическим технологиям: программного обеспечения распределенных и высокопроизводительных вычислительных систем; мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения; энергоэффективного производства и преобразования энергии на органическом топливе. Диссертация соответствует направлению Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации (Указ Президента РФ от 1 декабря 2016 г. № 642) «Переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике, повышение эффективности добычи и глубокой переработки углеводородного сырья, формирование новых источников, способов транспортировки и хранения энергии».

Экологические проблемы современной цивилизации требуют разработки и внедрения новых угольных технологий, обеспечивающих высокую полноту использования топлива в промышленной теплоэнергетике с целью повышения экономичности, надежности, безопасности и снижения вредного воздействия на окружающую среду. Решение указанных проблем может быть достигнуто при создании конкурентоспособных технологий переработки

угля и утилизации отходов в виде суспензионных угольных топлив. Несмотря на большой интерес энергетиков к этим вопросам, возможности совершенствования технологий получения и сжигания водотопливных смесей не исчерпаны. С этих позиций диссертационная работа С.В. Сыродоя, посвященная одному из самых перспективных технических решений – сжиганию угля в виде топливных композитов (водоугольное, органо- и био-водоугольное, древесно-угольное топлива), безусловно, актуальна.

Надо отметить, что на настоящее время разработанные математические модели, которые описывают процессы зажигания топливных частиц композиционных топлив, как правило, базируются на апостериорной информации о характеристиках и условиях воспламенения. Естественно, что в этих условиях применение таких моделей при проектировании топков котельных агрегатов, сжигающих смесевые топлива существенно ограничено. Соответственно, проблема математического описания процессов горения, включая все характерные стадии процессов термической подготовки, протекающих в индукционный период времени, на сегодняшний день стоит достаточно остро.

Таким образом актуальность темы диссертационных исследований обусловлена необходимостью разработки основных элементов теории зажигания и горения частиц композиционных топлив в условиях высокотемпературного нагрева в среде окислителя применительно к топочным устройствам котельных агрегатов тепловых электростанций.

Цель диссертационной работы сформулирована достаточно корректно и посвящена разработке основных элементов теории процессов зажигания и горения существенно-неоднородных композиционных топлив на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС, в рамках моделей механики сплошной среды, отличающихся от известных детальным описанием физико-химических, теплофизических и аэромеханических процессов, протекающих совместно в индукционный период времени при высокотемпературном нагреве капель и частиц топливных композиций на основе угля.

Полнота достижения поставленной цели. Автор точно сформулировал задачи исследований и решил их в полном объеме, обозначенном структурой диссертации и, как уже было отмечено выше, в полном соответствии с существующими тенденциями развития энергетики. Полученные в диссертации выводы и рекомендации согласуются и дополняют результаты исследований, проводимых в Сибирском федеральном университете, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН и других организаций, работающих в этом направлении.

Для решения поставленных задач использованы численные методы решений математических моделей с помощью пакетов прикладных программ MATLAB. Экспериментальные исследования комплекса быстропротекающих физико-химических и теплофизических процессов выполнены с использованием высокоскоростных и высокоточных средств видеорегистрации, включающих в себя высокоскоростную монохроматическую камеру Photron FASTCAM SA5, программное обеспечение Photron FASTCAM Viewer (PFV).

Степень достоверности результатов численного моделирования подтверждается использованием хорошо апробированных (в том числе и другими исследователями) численных методов решения задач тепло- и массопереноса и химической кинетики, использованием консервативных и абсолютно устойчивых разностных схем, выполнением принципов верификации физических и математических моделей, тестированием вычислительных технологий, проверкой консервативности разностных схем путем проведения сравнительного анализа экспериментальных и полученных по результатам численного моделирования характеристик. Обоснованность выводов и рекомендаций, достоверность результатов подтверждены сопоставлением численных и аналитических решений с большим объемом натурных и экспериментальных наблюдений и сомнений не вызывают.

Главная особенность настоящей работы заключается в проведение масштабных комплексных экспериментальных и теоретических исследований процессов зажигания и горения частиц перспективных (для целей энергетики) композиционных топлив в условиях, соответствующих типичным топочным устройствам паровых и водогрейных котлов, с целью

разработки теоретических основ, позволяющих проводить прогнозирование динамики процессов термической подготовки.

Обоснованность научных результатов исследования, выводов и рекомендаций обеспечивается использованием в качестве теоретической и методической основы диссертации канонической теории теплофизических, физико-химических и аэромеханических процессов, решением систем уравнений математической физики (с минимальными упрощающими допущениями), современных методов статистической обработки экспериментальных данных, хорошим соотношением экспериментальных и теоретических результатов.

Значимость для науки полученных результатов заключается в новом подходе к теоретическому описанию комплекса процессов, протекающих при иницировании горения топливных частиц, отличающегося от известных детальным описанием группы существенно влияющих на динамику воспламенения факторов: конвективный и радиационный нагрев, термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы в рамках существенно-разветвленной кинетической схемы реагирования, диффузия газообразных продуктов пиролиза, вдув последних в пристенную область частицы, движение газовой смеси в малой окрестности частицы топлива, гетеро и газо-фазное термохимическое реагирование продуктов пиролиза с окислителем, с учетом цепного характера протекания реакций.

Научная новизна работы состоит в следующем:

- Предложен новый подход к прогностическому моделированию физико-химических процессов, протекающих совместно в условиях интенсивных фазовых (испарение воды и жидкого горючего) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы, взаимодействие газообразных и твердых продуктов пиролиза между собой и с окислителем) превращений при воспламенении частиц композиционных топлив на основе угля.

- Впервые сформулирована и решена группа задач зажигания частиц существенно неоднородных водоугольных топлив при интенсивном радиационно-конвективном нагреве (внутритопочное пространство) в условиях совместного протекания основных процессов термической подготовки. Показано, что такой подход позволяет достичь высокого уровня достоверности прогностических оценок основных характеристик процесса горения.

- Разработан математический аппарат, описывающий процесс воспламенения структурно неоднородных частиц многокомпонентных топлив (органо-водоугольного и био-водоугольного). Учитывалось совместное протекание комплекса процессов термической подготовки в условиях фазовых (одновременное испарение воды и жидкого горючего) и термохимических (термическое разложение органической части угля и основных компонентов биомассы; воспламенение основных компонентов парогазовой смеси в рамках сложносоставной кинетики) превращений в индукционный период времени.

- Впервые сформулирована и решена задача зажигания частицы влажной древесной биомассы в условиях фрагментации приповерхностного слоя. Показано, что увеличение площади поверхности частицы на 30 % приводит к существенному уменьшению (на 40 %) значений времени задержки зажигания.

- Впервые решена задача совместного зажигания частиц биомассы и угля в условиях интенсивного высокотемпературного нагрева. При постановке задачи учтены структурная неоднородность по пространству в системе «уголь – биомасса – высокотемпературный окислитель»; фазовые переходы, протекающие при испарении влаги (как в частице угля, так и в частице древесины); термическое разложение обоих компонент топливной смеси; радиационный теплоперенос в газовой среде; термохимическое взаимодействие продуктов пиролиза (твердых и газообразных) с окислителем и между собой, с учетом существенно разветвленной кинетической схемы реагирования. Показано, что в идентичных условиях нагрева частицы биомассы воспламеняются всегда быстрее (на 50 %) угольных.

- По результатам проведенных исследований установлена степень влияния на условия и характеристики зажигания частиц композиционных топлив группы значимых факторов:

гетерогенность структуры вещества, температура внешней среды, размеры и форма частиц, влагосодержание, степень метаморфизма угля, вид биомассы, степень диспергации приповерхностного слоя топлива, радиационный теплоперенос, кинетика термического разложения древесины и термохимического реагирования летучих с окислителем, фильтрационное охлаждения каркаса топлива, приповерхностная водяная пленка.

- По результатам прогностического моделирования установлено, что для стабильного воспламенения частиц водоугольных топлив температура внешней среды должна быть не менее 750К.

- По результатам прогностического моделирования впервые обоснован механизм секвестрования оксидов серы и азота в период термической подготовки зажигания и горения частиц древесно – угольной смеси в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов. Показано, что в условиях совместного сжигания угля и биомассы при влажности последней $\geq 5\%$ интенсивность формирования оксидов серы и азота снижается в 6 раз и в 3 раза соответственно, по сравнению с процессами горения однородного угля.

- Впервые по результатам сравнительного анализа результатов численного моделирования процессов теплопереноса в системе «внутритопочная среда – трубная стенка – внутритрубный теплоноситель» установлено, что эффективность теплопередачи в топочном устройстве при сжигании водоугольного топлива в 2 раза выше, чем при горении однородного угля.

- По результатам проведенных исследований разработаны теоретические основы процессов воспламенения существенно неоднородных топливных композиций. Совокупность, полученных результатов можно квалифицировать как научное достижение в области исследований процессов горения существенно неоднородных топлив на основе угля в условиях, соответствующих камерам сгорания котельных агрегатов ТЭС.

Значимость для производства полученных результатов выражается в повышении надёжности, точности определения оптимальных режимов топливоподготовки, улучшении эксплуатационных характеристик оборудования для сжигания водоугольных суспензий, повышении технологичности производства и т.п. Разработанные математические модели и алгоритмы решения задач зажигания структурно-неоднородных топливных композиций на основе угля применимы при проведении опытно-конструкторских работ по разработке новых высокоэффективных котельных установок. Для проведения прогностического моделирования условий и характеристик зажигания существенно неоднородных топливных смесей разработаны программные коды для ЭВМ (получено 11 свидетельств о государственной регистрации программ). Результаты работы использовались при проектировании горелочного устройства, сжигающего водоугольное топливо, а также в проектных организациях, и могут быть внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлению 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», аспирантов по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, 01.04.17 – химическая физика, горение и взрыв, физика экстремального состояния вещества.

Результаты диссертационной работы могут быть использованы в энергетических системах и комплексах городов и регионов (например, ОАО «Енисейская ТГК (ТГК-13)» и других генерирующих компаний России) - при проектировании, производстве и организации процессов получения и сжигания новых видов топлив, в отраслях топливно-энергетического комплекса, а также в проектных и научно-исследовательских институтах: ВТИ (Москва), НПП «Сибэкотехника» (Новокузнецк), СибНТЦ (Новосибирск), Научно-исследовательском энергетическом институте им. Г.М. Кржижановского (Москва), Институте теплофизики СО РАН (Новосибирск), Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (Иркутск) и других, занимающихся решением проблем энергоэффективной топливоподготовки и экологически эффективных способов их сжигания. Основные результаты могут быть использованы в учебном процессе для бакалавров и магистров по направлениям подготовки «Теплоэнергетика и теплотехника» и «Техносферная безопасность» ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет» и иных ВУЗов.

По представленной работе имеются следующие замечания:

1. Диссертант претендует на лидерство в разработке теории процессов термической подготовки, зажигания и горения композиционных топлив. Однако в работе приведены математические прогностические модели процессов зажигания одиночных топливных частиц, при этом математических моделей горения факела не представлено. Было бы логично решить такую задачу, с целью полного замыкания фундаментальной базы процессов воспламенения и горения топливных композитов.

2. В преамбуле автореферата следовало бы упомянуть авторов различных технологий приготовления и использования ВУТ (ВУС), других видов композиционных топлив, что явилось основанием проведения данного исследования, и привести краткий сравнительный (фактографический) анализ.

3. Термин «Впервые» (стр. 6 автореферата) применительно к научной новизне не совсем уместен. Известны исследования сжигания (зажигания), например, лигнинов и других органических отходов производства в составе композиционных топлив на основе ВУС (например, работы В.И. Мурко, М.П. Барановой и др.). Здесь же может идти речь о развитии (совершенствовании) технологии био-ВУТ.

4. В настоящее время известно большое количество программных комплексов для численного моделирования горения топливных частиц и в этом смысле не ясно насколько разработанные автором оригинальные модели и численные методики являются эффективными по сравнению с ними.

5. Диссертант утверждает, что технология сжигания угля в виде топливных композитов является самым перспективным направлением развития энергетики в будущем. Однако анализ публикация в мировых научных изданиях показывает, что очень много усилий мирового научного сообщества направлено на развитие технологий газификации угля. Имело бы смысл привести в диссертации сравнительный анализ преимуществ и недостатков этих двух технологий?

6. Из диссертации не ясно, почему при решении задач сопряженного теплопереноса в качестве допущения выбрана ламинарная постановка задача расчета гидродинамики в малой окрестности частицы топлива?

7. В главе 7 приведено решение задачи теплопередачи от внутритопочной среды к внутритрубному теплоносителю в условиях постоянной скорости роста слоя отложений на трубной поверхности. При этом принято допущение о постоянстве значения коэффициента теплоотдачи, который зависит от толщины отложений.

8. В диссертации разработано достаточное количество оригинальных математических моделей и выполнено большое количество численных расчетов. При этом вопросы численной реализации этих моделей в диссертации в большинстве случаев освящены не в полной мере. Так, в частности, не ясно проводилось ли исследование разработанных численных алгоритмов на сеточную сходимость.

Сделанные замечания не снижают в целом высокой оценки диссертации, основное содержание которой вполне достаточно опубликовано в рецензируемой печати – 40 статей в журналах, рекомендованных ВАК РФ для публикации материалов кандидатских и докторских диссертаций и приравненных к ним из международных баз Scopus и WoS. Материалы диссертации достаточно хорошо апробированы на различных научных конференциях. Автореферат полностью соответствует рукописи диссертации.

Общее заключение по диссертационной работе:

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, имеет внутреннее единство и является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

Диссертация полностью соответствует требованиям, установленным пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства

Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. (в ред. от 11.09.2021 г.), а ее автор, Сыродой Семен Владимирович достоин присуждения ученой степени доктора технических наук.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании объединенного научного семинара кафедр теплотехники и гидрогазодинамики и теплофизики, протокол № 1 от 04 мая 2022 г.

**Зав. кафедрой теплотехники и гидрогазодинамики,
Почетный работник науки и техники РФ,
профессор, д-р техн. наук по специальностям:
01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника
01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы**

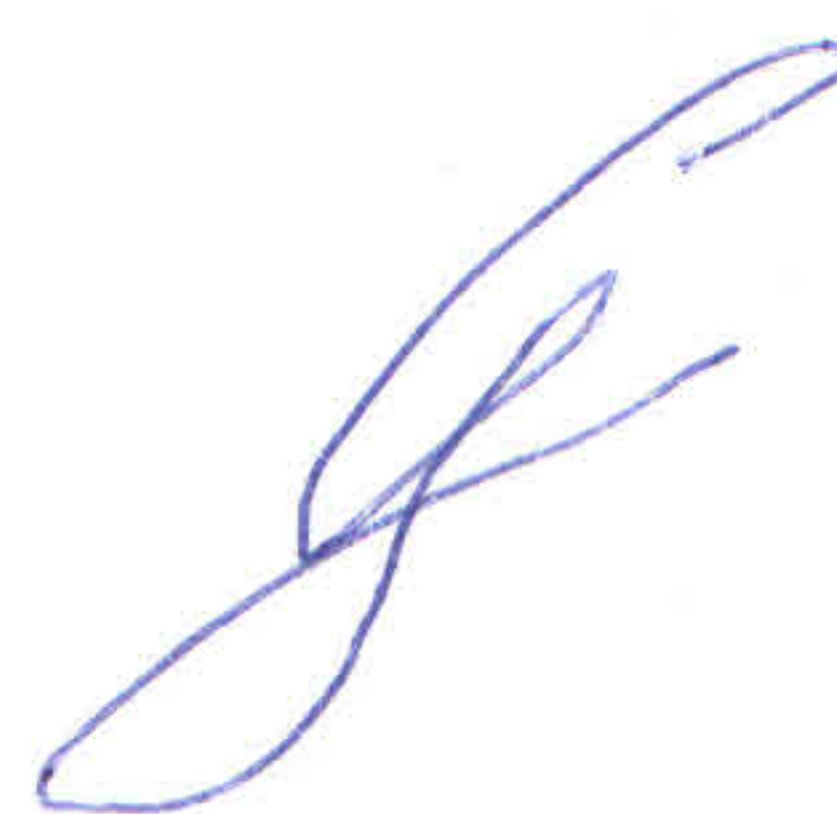
Владимир Алексеевич Кулагин

04.05.2022 г.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет»,
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79/10,
Телефон: +7 (391) 244-86-25. E-mail: office@sfu-kras.ru

Поступил в совет 11.05.2022г.
Учёный секретарь ДС Шуверкин О.В.

С отзывом ознакомлен 19.05.2022

 Сергей Л.В.