

**ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ**



На правах рукописи



**Косторева Анастасия Андреевна**

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДИСПЕРГИРОВАННОЙ  
ДРЕВЕСИНЫ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

**Научный руководитель:** **Кузнецов Гений Владимирович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
профессор НОЦ И.Н. Бутакова ИШЭ НИ ТПУ

**Официальные оппоненты:** **Богомолов Александр Романович**  
доктор технических наук, профессор, заведующий  
кафедрой теплоэнергетики федерального  
государственного бюджетного образовательного  
учреждения высшего образования «Кузбасский  
государственный технический университет имени  
Т.Ф. Горбачева», г. Кемерово.

**Прибатурин Николай Алексеевич**  
доктор технических наук, член-корреспондент РАН,  
заведующий лабораторией физической  
гидродинамики Института теплофизики им. С.С.  
Кутателадзе Сибирского отделения Российской  
академии наук, г. Новосибирск.

Защита состоится «29» 09 2023 г. в 14:30 часов на заседании диссертационного совета ДС.ТПУ.18 Национального исследовательского Томского политехнического университета по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7, уч. корпус 8, ауд. 217.



С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке Томского политехнического университета и на сайте [dis.tpu.ru](http://dis.tpu.ru) при помощи QR-кода.

Автореферат разослан «            »            20            г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
кандидат технических наук



Табакаев Роман  
Борисович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одной из основных задач современной энергетики является внедрение в общий баланс производства тепловой и электрической энергии нетрадиционных возобновляемых источников энергии (ВИЭ). К последним относятся ветровые электростанции и фотоэлектрические преобразователи. Но, несмотря на все декларируемые сторонниками этих ВИЭ преимущества, последние, скорее всего, в ближайшей (и в среднесрочной тоже) перспективе не станут основой энергетических систем будущего. Другими словами, фотоэлектрические преобразователи, в основном, являются поглотителями энергии, если рассматривать полный цикл «изготовление – работа – утилизация». Можно обосновано предположить, что будущее энергетики, скорее всего, - гибридная и адаптивная энергетическая система, включающая в себя традиционные (тепловые и атомные электрические станции, обеспечивающие базовую энергетическую нагрузку) и нетрадиционные (ветро-электрогенераторы, солнечные батареи или более экзотические – приливные ГЭС) источники энергии. Главным элементом такой системы должны быть высокоёмкие энергонакопители. Но в настоящее время таких накопителей электрической энергии почти нет, а эффективность работы функционирующих очень мала. Более того, нет надежного научного задела для создания мощных накопителей электрической энергии не только в ближайшие годы, но и в среднесрочной перспективе. В этой связи более перспективным (а может и самым перспективным) возобновляемым источником энергии является биомасса (отходы деревопереработки и сельского хозяйства, а также лесной горючий материал). Древесная биомасса имеет несколько вполне очевидных значимых преимуществ, как по сравнению с традиционными энергоносителями (уголь или нефть), так и с ветрогенераторами и солнечными батареями. Во-первых, древесина является единственным углерод-нейтральным топливом. При ее сжигании формируется диоксид углерода, который не нарушает общего баланса  $\text{CO}_2$  в мировом геохимическом цикле углерода. Во-вторых, древесная биомасса является относительно дешевым источником энергии: древесина различных видов и пород произрастает практически во всех (за исключением Антарктики и пустыни Атакама) регионах планеты. Соответственно, можно обосновано предположить, что более активное внедрение в энергобаланс древесной биомассы приведет к сглаживанию ценовой «турбулентности» на основных мировых торговых площадках, на которых торгуются энергоносители. В-третьих, (очень важное преимущество), древесная биомасса, как правило, практически не содержит серы (во всяком случае много меньше чем у углей). Соответственно, при ее сжигании образуется значительно меньше по сравнению с углями  $\text{SO}_x$ . Также по результатам экспериментальных исследований установлено, что при совместном сжигании угля с биомассой существенно снижаются концентрации оксидов азота и серы в дымовых газах таких смесей по сравнению с процессами горения однородного угля.

По этим причинам обоснование возможности эффективного сжигания частиц древесной биомассы по результатам проведения систематических экспериментальных исследований процессов зажигания и горения частиц древесины в представляющем интерес для практики диапазоне изменения размеров

и форм последних является важной и нерешенной пока задачей современной теплоэнергетики.

**Научно - техническая проблема.** Необходимо по результатам экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесины установить основные закономерности этих процессов и обосновать возможность использования древесной биомассы определенного фракционного состава в качестве топлив теплоэлектроцентралей и котельных с целью сбережения энергетических ресурсов и защиты окружающей среды.

**Цель работы.** Обоснование по результатам экспериментальных исследований основных закономерностей процессов тепло- и массопереноса, протекающих в условиях интенсивных фазовых и термохимических превращений в период термической подготовки диспергированной древесной биомассы к сжиганию, параметров диспергированной древесины в качестве топлива котельных установок предприятий теплоэнергетики.

**Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:**

1. Разработка экспериментального стенда и методики исследования процессов термической подготовки частиц древесины в потоке высокотемпературного окислителя – воздуха.

2. Установление по результатам экспериментов основных закономерностей процессов термической подготовки частиц древесины.

3. Анализ степени влияния расстояния между частицами древесной биомассы на характеристики процесса их термической подготовки.

4. Установление по результатам экспериментов влияния влажности на условия и характеристики процесса термической подготовки частиц древесной биомассы.

5. Анализ влияния анизотропии древесины на условия и характеристики процессов термической подготовки.

6. Определение наиболее предпочтительных (с целью минимизации времён термической подготовки) расстояний между частицами древесины.

**Научная новизна.** По результатам впервые проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесины установлены основные закономерности исследовавшихся процессов (условия, механизмы и характеристики термической подготовки частиц древесины) в широких диапазонах варьирования основных значимых факторов и обоснована возможность эффективного использования диспергированной древесины в качестве топлива котельных установок.

**Практическая значимость работы.** Обоснована возможность вовлечения в энергетический сектор не только отходов лесопиления и лесопереработки, а также древесины не хвойных пород в качестве основного топлива, существенно снижающего себестоимость производства теплоты и электроэнергии, а также уменьшающего существенно содержание в дымовых газах теплоцентралей и котельных антропогенных веществ (оксидов серы и азота, летучей золы).

**Достоверность.** Экспериментальные исследования проводились с использованием современных средств регистрации характеристик исследовавшихся процессов (времен термической подготовки) с малыми методическими погрешностями. Для каждого сочетания контролируемых факторов

в эксперименте проводилась серия из не менее 15 опытов. Определялись доверительные интервалы времен термической подготовки частиц древесной биомассы. Результаты экспериментов подтверждаются их хорошей повторяемостью.

### **Связь работы с научными программами и грантами.**

Диссертационные исследования выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект 18-79-10015-п «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки, воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов»).

### **Научные положения, результаты и выводы, выносимые на защиту.**

1. Разработана методика экспериментального исследования процессов термической подготовки частиц древесины в условиях, соответствующих условиям котельных установок.

2. Проведенные эксперименты показали, что форма и размеры частицы древесной биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания при относительно низких температурах внешней среды (до 1073 К).

3. Установлено, что при идентичных объемах частицы в форме пластины зажигаются значительно быстрее частиц, выполненных в форме куба и прямоугольного параллелепипеда.

4. Показано, что характерный размер частиц древесины, выполненных в форме куба не оказывает значимого влияния на характеристики и условия воспламенения в диапазоне изменения характерного размера частиц от 4 до 10 мм.

5. По результатам экспериментов установлено, что в условиях низкотемпературного нагрева ( $T_g \leq 873\text{K}$ ) времена термической подготовки частиц древесной биомассы, выполненных в виде прямоугольного параллелепипеда, зависят от размера немонотонно. При этом с увеличением объемов ( $V$ ) частицы, сначала значения  $t_{\text{ign}}$  увеличиваются, а после перехода через некое пороговое значение  $V$  времена задержки уменьшаются.

6. Для частиц древесной биомассы пластинообразной формы увеличение характерного поперечного размера частиц топлива приводит к линейному росту значений  $t_{\text{ign}}$ .

7. В области умеренных температур ( $T \leq 873\text{K}$ ) времена термической подготовки частицы из сосны много меньше частиц из берёзы, кедра и осины.

8. В условиях высокотемпературного нагрева ( $T \geq 1073\text{K}$ ) вид древесной биомассы не оказывает значимого влияния на численные значения времён термической подготовки.

9. Анизотропия древесины не оказывает значимого влияния на длительность периода термической подготовки.

10. При расстоянии между частицами  $l=4\delta$  ( $\delta$ - характерный размер частицы) время задержки зажигания частиц в группе сопоставимо со значениями  $t_{\text{ign}}$  одной частицы

**Личный вклад.** Автор диссертации провела планирование и подготовку экспериментальных исследований, выполнила эксперименты, обработку и анализ полученных результатов, оценку погрешностей, анализ и обобщение полученных

результатов. Также автор проводила написание статей и подготовку докладов для выступления на конференциях. Автором сформулированы основные защищаемые положения, результаты и выводы.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты диссертационных исследований докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

1. XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (24-27 ноября Новосибирск, 2020);

2. XXXV Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых «Сибирский теплофизический семинар» (27-29 августа Новосибирск, 2019);

3. VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (9-11 октября Томск, 2019);

4. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (23-25 апреля Томск, 2019);

5. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (19-21 апреля Томск, 2022);

6. Научно-практическая конференция работающей молодежи Группы «Интер РАО» 2022 (15-18 ноября 2022, Москва).

7. XXIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством академика РАН А.И. Леонтьева, посвященная 100-летию академика В.Е. Алемасова Проблемы газодинамики и тепломассобмена в энергетических установках (23-27 мая 2023, Казань).

**Публикации.** Опубликовано три статьи в международных научных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science»: «Biomass and bioenergy», «Journal of the Energy Institute», «Renewable Energy» и статья в журнале, рекомендованном ВАК РФ для публикации материалов кандидатских диссертаций: «Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов».

### **Структура и объем работы.**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы, изложена на 97 страницах, содержит 25 рисунков и 1 таблицу. Список литературы состоит из 90 источников.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы и сформулирована проблема. Также сформулированы цель диссертационной работы и задачи для ее достижения. Показаны практическая значимость и научная новизна проведенных исследований.

**Первая глава** содержит анализ современного состояния теории и практики использования в промышленной теплоэнергетике древесины в качестве топлива. Проведен анализ публикаций по исследованиям сжигания древесной биомассы в мировой научной периодике. Обоснована перспективность таких топлив. Показано, что исследования процессов сжигания биомассы вела большая группа исследователей наиболее значимые результаты получены Hesameddin Fatehi, Wubin Weng, Mário Costa, Zhongshan Li, Miriam Rabaçal, Marcus Aldén, Xue-Song Bai, Рябов

Г.В, Hao Zhou, Yuan Li, Ning Li, Kefa Cen, Сыродой С.В., Стрижак П.А., Косторева Ж.А., Гутарева Н.Ю., Нигай Н.А., Кузнецов Г.В.

**Вторая глава** посвящена описанию подготовки и методики проведения экспериментальных исследований. Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов зажигания частиц древесины с воспроизведением условий, в наибольшей степени соответствующих условиям топок паровых и водогрейных котлов.

Экспериментальные исследования проведены на стенде, схема которого показана на рисунке 1. Основная часть экспериментального стенда представляет собой полую цилиндрическую камеру сгорания, заполненную воздухом. С целью формирования внутри камеры условий нагрева, соответствующих топочным устройствам котельных агрегатов (диапазон температур окислителя  $T_g=873 - 1273\text{K}$ ), на внешнюю поверхность цилиндра крепился электрический нагреватель. Нагревательный комплекс совместно с камерой сгорания устанавливался в теплоизолированной кожухе. На оси симметрии цилиндра на расстоянии  $\sim 0,5$  м от его торца на металлической игле-держателе закреплялась частица древесной биомассы. С другой стороны печи располагалась высокоскоростная видеокамера FASTCAM Phantom 5 (скорость видеосъемки до 10 000 кад/сек). В начальный момент времени вся нагревательно-регистрационная система начинала двигаться по направлению к частице древесины. Перед вводом последней в печь торцевые заслонки нагревательного цилиндра открывались. При этом частицы биомассы попадали в фокус объектива высокоскоростной видеокамеры.

Следует отметить что в реальных топочных условиях смесь продуктов сгорания топлива и воздуха перемещается со скоростями, составляющими 1-5 м/с. Но малые по размерам частицы древесины движутся в топочном пространстве со скоростью, практически идентичные скорости несущей частицу среды. Чем больше концентрация частиц топлива в единице объема и чем меньше размер частиц, тем меньше отличаются скорости несущей среды и частиц. По этим причинам в топках котельных установок, как правило, доминирует радиационный теплообмен, интенсивность которого много выше интенсивности конвективного теплообмена.

Период времени от начала теплового воздействия (момент попадания частицы в фокус камеры) до момента воспламенения (появления первого пламени) считался временем термической подготовки ( $t_{\text{ign}}$ ), которое определялось после анализа кадров видеogramм, как разность моментов времени ввода частицы в канал с нагретым до высоких температур воздухом и моментом появления пламени вблизи поверхности частицы.

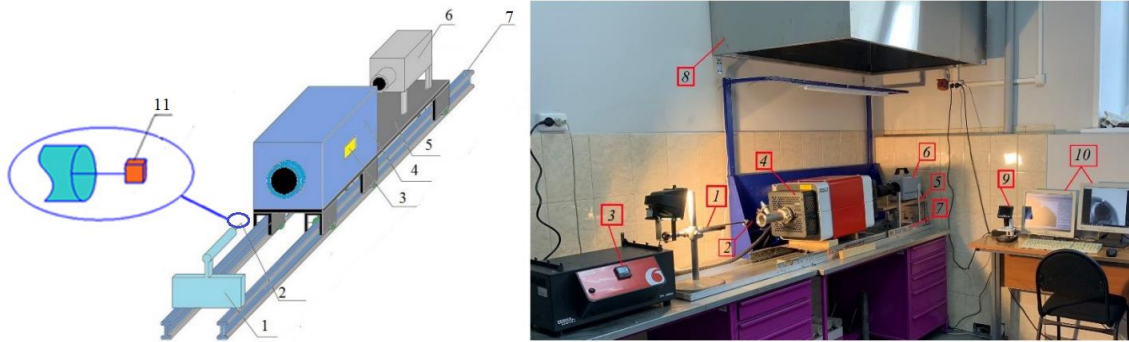


Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – держатель; 2 – металлическая игла; 3 – модуль управления; 4 – высокотемпературная печь; 5 – передвижная платформа; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – рельсы; 8 – система вентиляции; 9 – микроскоп; 10 – компьютер; 11 – образец древесины.

В третьей главе представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесной биомассы. На рисунке 2 *a-c* приведены зависимости  $t_{\text{ign}}(T)$  при разных размерах частиц. Хорошо видно, что форма и объём частиц не всегда оказывают значимое влияние на характеристики их зажигания. Так времена термической подготовки частиц кубической формы не зависят от их объема (или характерного размера) в диапазоне  $64 \text{ мм}^3 \leq V \leq 960 \text{ мм}^3$ . Численные же значения  $t_{\text{ign}}$  частиц древесины кубической формы при одних и тех же температурах среды заметно больше  $t_{\text{ign}}$  частиц-параллелепипедов и частиц-пластин идентичного объема. Эти закономерности проявляются устойчиво. Отклонение значений  $t_{\text{ign}}$  частиц разной формы значительно (в несколько раз) превышает доверительные интервалы определения времен термической подготовки.

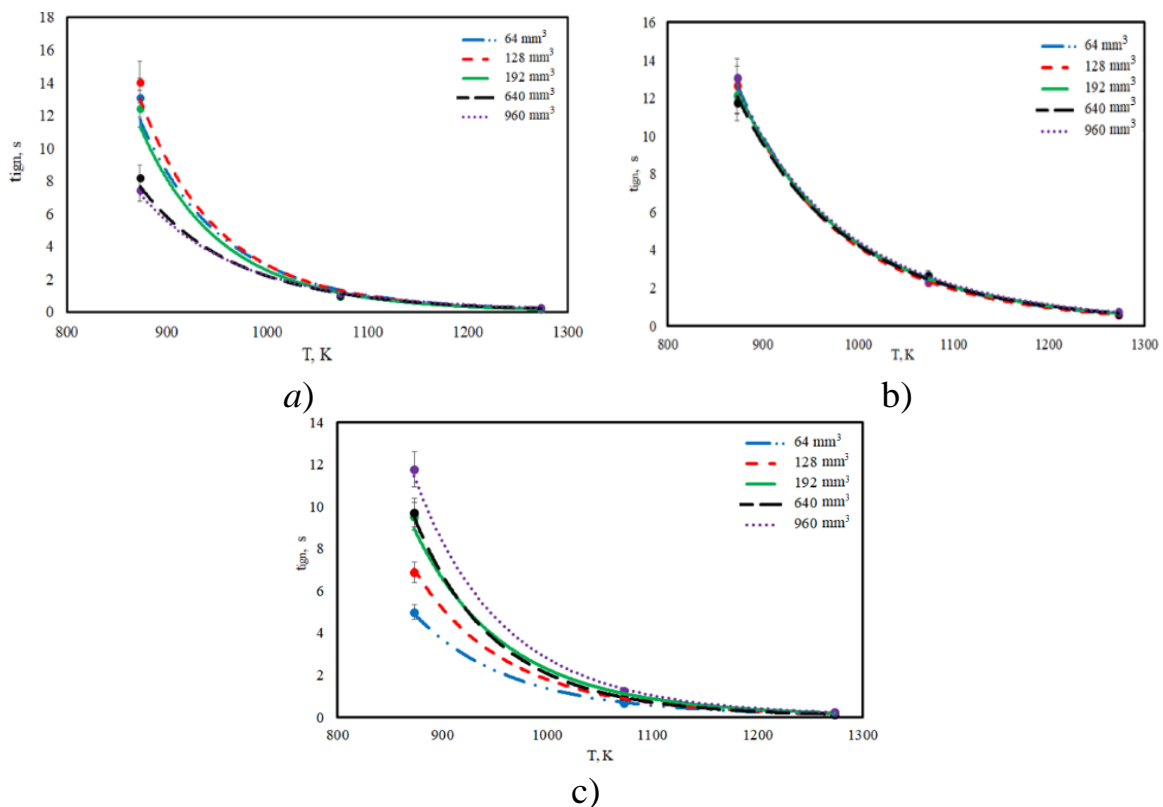




Рисунок 2 – Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды при различных характерных размерах.

а – частицы в форме параллелепипеда,

б – частицы в форме куба;

с – частицы в форме тонкой пластины.

Кроме того, слоевая структура многих пород древесины приводит к анизотропии их теплофизических и фильтрационных свойств, которые, существенно влияют на условия и характеристики этого процесса. Так, например, повышение коэффициента теплопроводности вещества приводит к увеличению времени задержки зажигания, а снижение коэффициента теплопроводности к снижению этого времени. По этим причинам были проведены эксперименты при разной ориентации частиц древесины относительно потока излучения. В экспериментах реализованы три варианта расположения частиц древесной биомассы в неподвижной (в начальный момент времени) окислительной среде. При проведении экспериментальных исследований в том числе оценивалось влияние ориентации частиц древесной биомассы (ее волокон) на характеристики протекания процессов их зажигания. На рисунке 3 приведены три реализованные в экспериментах ориентации частицы древесной биомассы.

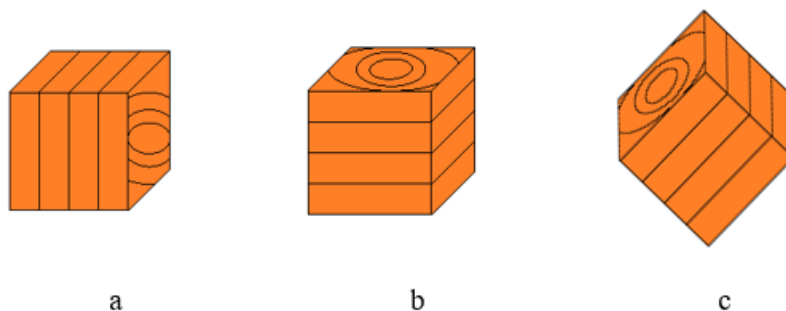


Рисунок 3 - Варианты конфигурации частиц древесины в пространстве нагрева в зависимости от положения волокон

На рисунке 3 приведены времена термической подготовки частиц древесной биомассы в зависимости от температуры внешней среды для четырех исследовавшихся пород древесины. Можно отметить, что времена задержки зажигания трех видов древесины (береза, осина и кедр) во всем исследовавшемся температурном диапазоне отличаются незначительно. В то же время, в условиях низкотемпературного нагрева ( $T_g \leq 873$  К) частицы сосны начинают гореть значительно (на 40 %) быстрее частиц других пород древесины. Это обусловлено тем, что, как известно, в древесине сосны содержится значительно больше летучих, по сравнению с древесиной кедра, березы и осины. Но времена  $t_{ign}$  всех исследовавшихся видов древесины в условиях относительно высоких температур внешней среды ( $T_g \geq 1073$  К) практически идентичны (отклонения не превышают 5%).

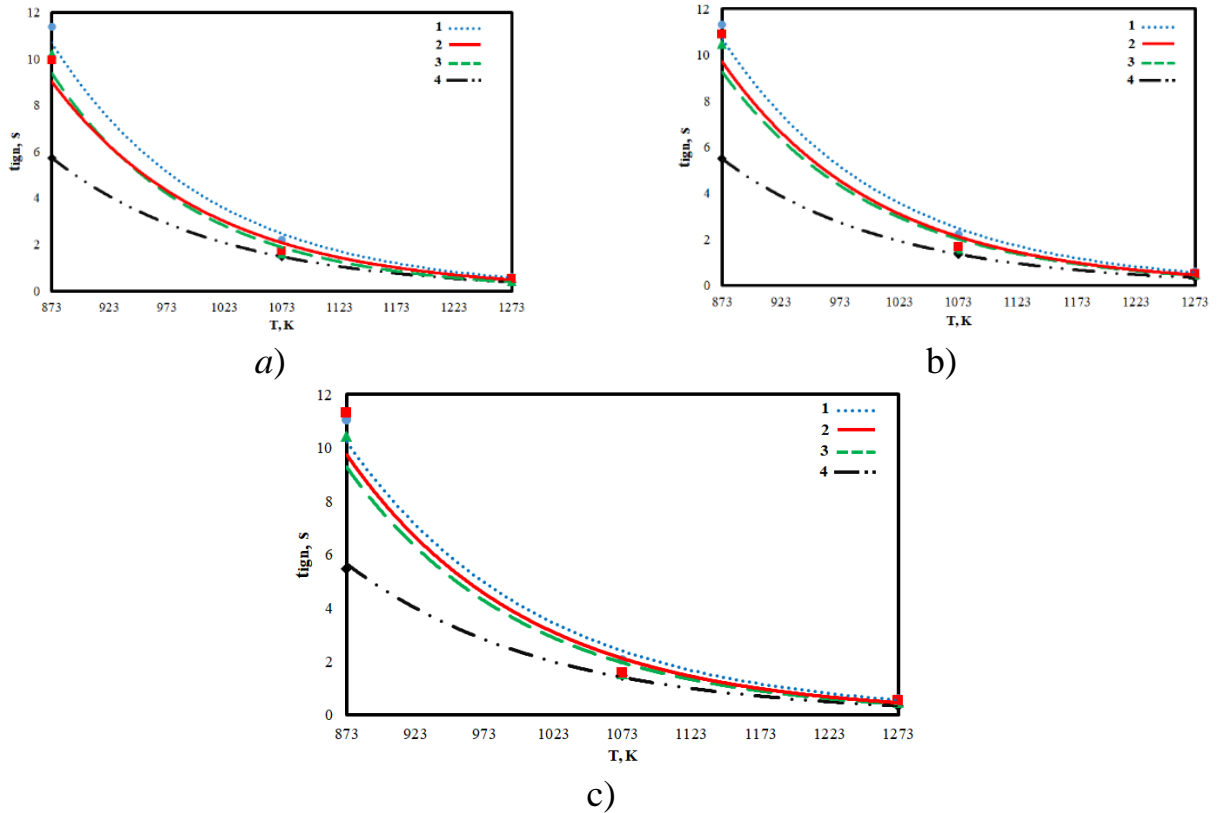
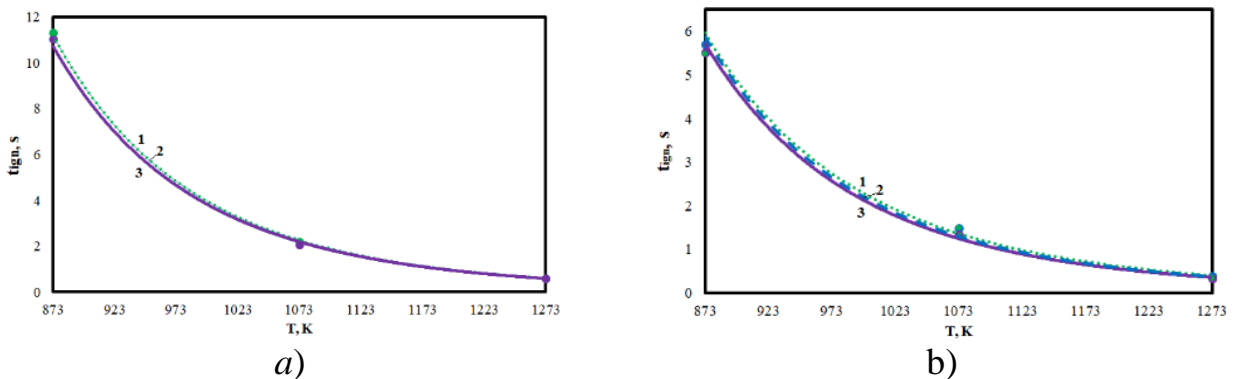


Рисунок 4 – Зависимости времён термической подготовки сухих частиц древесной биомассы от температуры внешней среды. Обозначения рисунков (а-с) соответствуют ориентациям частиц древесины в пространстве, приведенным на рисунке 3:

Рис. 4а – соответствует рисунку 3а; Рис. 4б – соответствует рисунку 3б; Рис. 4с – соответствует рисунку 3с.

Обозначения на рисунках: 1 – береза; 2 – осина; 3 – кедр; 4 – сосна

На рисунке 5 приведены аналогичные рисунку 4 зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы различных пород древесины, сгруппированных по видам древесины, с целью оценки влияния ориентации направления волокон в пространстве. Можно отметить идентичную для всех исследовавшихся видов биомассы особенность: ориентация древесных частиц в пространстве не оказывает влияния на временные характеристики процесса зажигания. Эта тенденция сохраняется для всех исследовавшихся видов древесины.



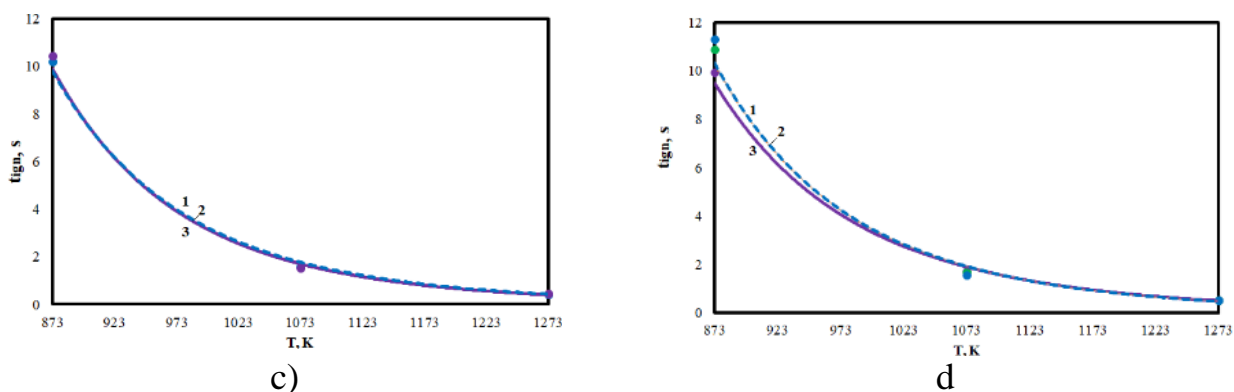


Рисунок 5 – Зависимости времён термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды при трех ориентациях частиц древесины в пространстве:

1 – вертикально, 2 – горизонтально, 3 – диагональ.

Обозначения рисунков соответствуют видам древесины:

a – береза; b – сосна; c – кедр; d – осина.

На рисунке 6 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц четырех видов биомассы (сухих и влажных) от температуры внешней среды (воздуха). Видно, что с ростом температуры влага частиц оказывает всё меньшее влияние на величины  $t_{ign}$ . При низких температурах (873K) времена задержки зажигания сухих и влажных частиц всех четырех видов древесины отличаются в 2-2,5 раза.

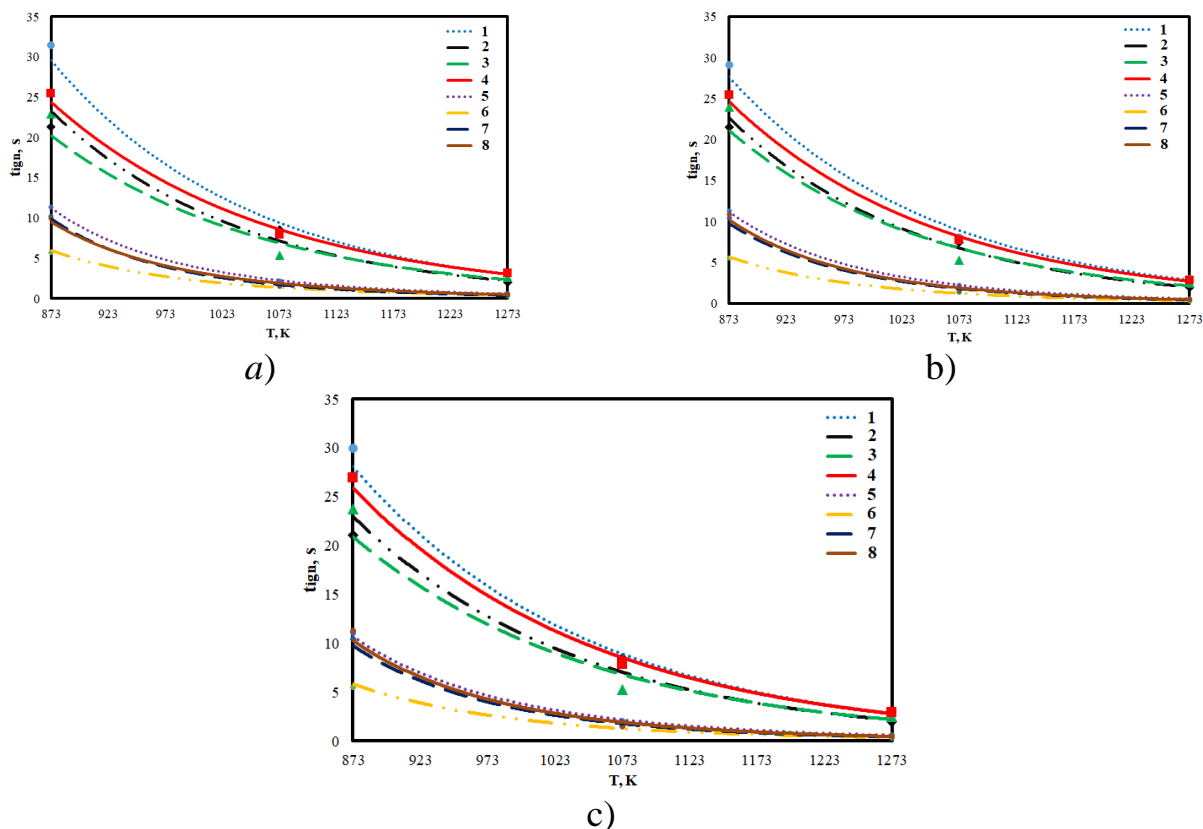


Рисунок 6 – Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды. При ориентации древесины в пространстве в соответствии с:

a – рисунок 3a; b – рисунок 3b; c – рисунок 3c

Обозначения на рисунках:

1 – береза влажная; 2 – осина влажная; 3 – кедр влажный; 4 – сосна влажная.

5 – береза сухая; 6 – осина сухая; 7 – кедр сухой; 8 – сосна сухая.

На основании анализа результатов, выполненных экспериментов можно сделать вывод, что зажигание частиц влажной древесной биомассы происходит в газовой фазе на расстоянии, зависящем от температуры внешней среды, чем больше температура воздуха, тем больше расстояние от поверхности частицы до зоны начала горения газообразных продуктов пиролиза древесины.

Следует отметить, что в реальной практике число частиц в потоке горячего воздуха после распыления через форсунки может быть очень большим (до 110000 частиц в 1м<sup>3</sup>). Но условия их взаимодействия при трех, пяти и более частиц в группе определяются, скорее всего, процессами, протекающими при взаимодействии двух частиц (если их влияние друг на друга есть). Поэтому эксперименты с двумя частицами являются достаточно представительными. Исследовался процесс термической подготовки частиц с характерными размерами  $\delta=3,5$  мм и  $\delta=6$  мм сухой древесной биомассы при разных расстояниях между ними.

На рисунке 7 и 8 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц древесины от температуры внешней среды при различных межосевых расстояниях между двумя частицами.

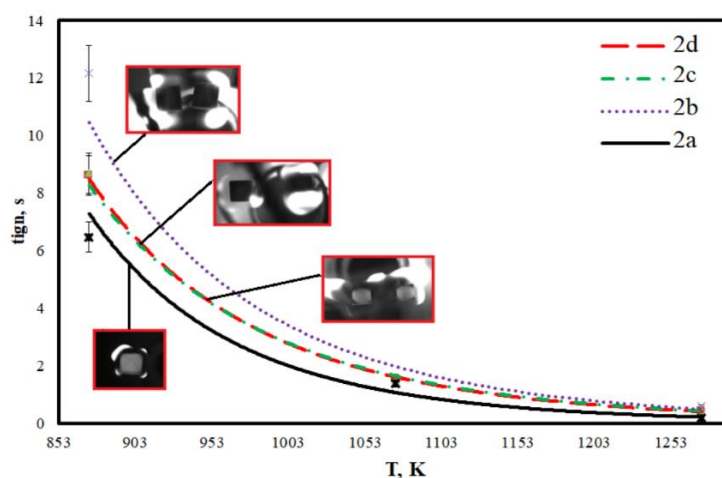


Рисунок 7 - Зависимость времен термической подготовки частиц древесной биомассы в зависимости от температуры внешней среды при разных межосевых расстояниях с характерным размером частиц  $\delta=3,5$  мм

В проведенных экспериментах минимальные расстояния между двумя частицами с характерными размерами 6 мм составляло 3 мм, а в экспериментах с частицами размером 3,5 мм минимальное расстояние составляло 1,75 мм. Такой газовый зазор по существу минимизировал поток излучения к граням частиц, обращенным к этому зазору. В результате нагрев частиц осуществлялся в основном по внешним граням, и зажигание происходило (Рисунок 7) в малых окрестностях этих граней. Но уже при расстоянии между частицами 3,5 мм (Рисунок 7) время задержки их зажигания отличалось от  $t_{ign}$  одиночной частицы не более чем на 12%.

При дальнейшем росте расстояния между частицами (Рисунок 8) их влияние друг на друга практически отсутствовало. Также можно отметить, что в связи с зависимостью лучистого потока от  $T$  в четвертной степени, рассмотренные эффекты наиболее отчетливо проявлялись при относительно низких температурах.

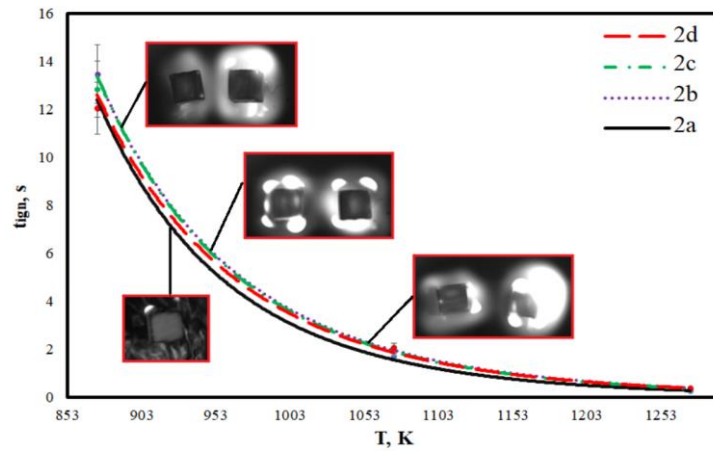
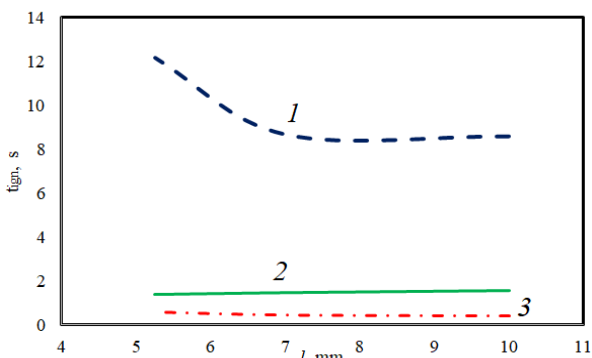
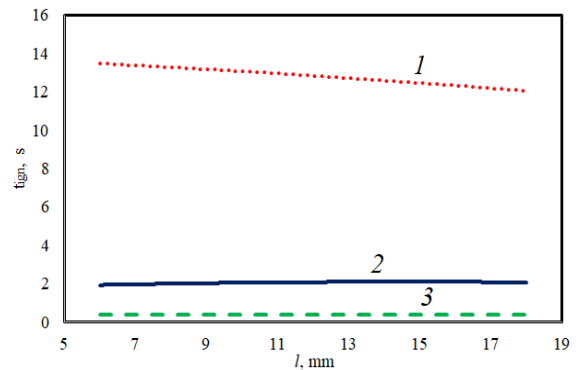


Рисунок 8 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температур внешней среды при разных межосевых расстояниях с характерным размером частиц  $\delta=6$  мм

На рисунках 9 а, б приведены зависимости времен задержки зажигания частиц древесной биомассы от расстояния между ними при различных температурах внешней среды. Можно отметить, что в условиях относительно низких температур расстояние между частицами биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия зажигания. В тоже время увеличение температуры внешней среды приводит к тому, что влияние  $l$  на значения  $t_{ign}$  становится незначительным (в пределах значимости для реальной практики). При этом можно отметить, что для частиц биомассы с характерным размером  $\delta=3,5$  мм (рисунок 8а) при  $T_g=873$  К увеличение расстояния между частицами сначала приводит к уменьшению значений  $t_{ign}$ . При дальнейшем росте  $l$  значительного изменения времен задержки зажигания не происходит. При этом видно, что в этом случае времена задержки зажигания группы из двух частиц асимптотически стремятся к значениям  $t_{ign}$  одной частицы. Аналогичная картина наблюдается при анализе времен задержки зажигания частиц древесной биомассы с  $\delta=6$  мм (рисунок 9б).



а)



б)

Рисунок 9 – Зависимость времен термической подготовки группы из 2-х частиц древесной биомассы от расстояния между ними при характерном размере последних:

а -  $\delta=3,5$  мм; б -  $\delta=6$  мм;

Где: 1 –  $T_g=873\text{K}$ ; 2 –  $T_g=1073\text{K}$ ; 3 –  $T_g=1273\text{K}$

Проведенные эксперименты показали, что расстояние между частицами древесины оказывает заметное влияние на характеристики и условия их совместного воспламенения при относительно низких температурах внешней среды ( $T_g \leq 873\text{K}$ ). Как было сказано выше, это обусловлено, скорее всего тем, что в условиях совместного нагрева каждая частица древесной биомассы «экранирует» соседнюю от теплового излучения (другими словами, каждая топливная частица находится в области геометрической тени соседних частиц). В результате интенсивность радиационного нагрева существенно снижается.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Разработана методика экспериментального исследования процессов термической подготовки частиц древесины.
2. Проведенные эксперименты показали, что форма и размеры частицы древесной биомассы оказывает существенное влияние на характеристики и условия начала горения при относительно низких температурах внешней среды.
3. Установлено, что при идентичных объемах частицы в форме пластины зажигаются значительно быстрее частиц, выполненных в виде куба и прямоугольного параллелепипеда.
4. Показано, что характерный размер частиц древесины, выполненных в форме куба не оказывает значимого влияния на характеристики и условия воспламенения.
5. По результатам экспериментов установлено, что в условиях низкотемпературного нагрева ( $T_g \leq 873\text{K}$ ) времена термической подготовки частиц древесной биомассы, выполненных в виде прямоугольного параллелепипеда, зависят от размера немонотонно. При этом с увеличением объема частицы, сначала значения  $t_{\text{ign}}$  увеличиваются, а после перехода через некое пороговое значение уменьшаются.
6. При воспламенении частиц древесной биомассы пластинообразной формы увеличение характерного размера приводит к линейному росту значений  $t_{\text{ign}}$ .
7. В области умеренных температур ( $T \leq 873\text{K}$ ) частицы из сосны зажигаются значительно быстрее частиц из берёзы, кедра и осины.
8. В условиях высокотемпературного нагрева ( $T \geq 1073\text{K}$ ) вид древесной биомассы не оказывает влияния на численные значения времён задержки зажигания.
9. Ориентация частицы кубической формы в пространстве не оказывает влияния на характеристики зажигания.
10. При расстоянии между частицами  $l=4\delta$  ( $\delta$ - характерный размер частицы) время задержки зажигания частиц в группе сопоставимо со значениями  $t_{\text{ign}}$  одной частицы

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ С РЕЗУЛЬТАТАМИ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Статьи в международных научных журналах, индексируемых базами данных «Scopus» и «Web of Science»:

1. Kuznetsov G.V., Syrodoy S.V., **Kostoreva A.A.**, Kostoreva Z.A., Purin M.V., Malyshev D.Y. Increasing the concentration of woody biomass in the furnace room according to the characteristics and conditions of ignition. *Journal of the Energy Institute*, 101 (2022) 256 - 276
2. G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, B.V. Borisov, Zh.A. Kostoreva, N. Yu Gutareva, **A.A. Kostoreva**. Influence of homeomorphism of the surface of a wood particle on the characteristics of its ignition. *Renewable Energy*. 203 (2023) 828-840
3. G.V. Kuznetsov, S.V. Syrodoy, Zh.A. **Kostoreva, A.A.** Kostoreva, D. Yu. Malyishev, N.A. Nigay, N. Yu. Gutareva. Influence of a cubic wood particle orientation in space on the characteristics and conditions of its ignition. *Biomass and Bioenergy* 170 (2023) 106704

Статья из Перечня ВАК рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук:

1. Syrodoy S.V., Malyshev D.Y., Kostoreva Z.A., **Kostoreva A.A.**, Omarov A. A. Ignition of wooden biomass particles under microwave exposure to high-temperature radiation-convective heating. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering* 334 (5) (2023)