

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи

**Косторева Анастасия Андреевна**

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

**2.4.6 Теоретическая и прикладная теплотехника**

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор физико-математических наук, профессор  
Кузнецов Гений Владимирович

Томск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ .....	14
1.1 Экономические предпосылки применения биомассы в энергетике ....	14
1.2 Основная проблематика исследований.....	15
1.3 Современное состояние теории и практики процессов термической подготовки частиц биомассы. ....	18
1.4 Выводы по первой главе.....	20
ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ .....	22
2.1. Подготовка топлива .....	22
2.2. Исследованные материалы.....	23
2.3. Конфигурации взаимного расположения частиц для воспроизведения условий их нагрева в топочном пространстве .....	23
2.4. Методика проведения экспериментов .....	28
2.5. Выводы по второй главе.....	32
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА .....	34
3.1. Влияние формы и размеров частиц древесной биомассы на характеристики процесса термической подготовки.....	34
3.2. Особенности механизма зажигания сухих частиц древесной биомассы.....	45
3.3. Особенности механизма зажигания влажной частицы древесной биомассы .....	58

3.4. Исследование процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях сложного нагрева .....	65
3.5. Влияние расстояния между частицами древесной биомассы на времена их термической подготовки .....	74
3.6. Выводы по третьей главе .....	84
ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ .....	86
ОБОЗНАЧЕНИЯ.....	87
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	88

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все большее внимание мирового сообщества уделяется проблемам экологии и глобального потепления [1]. Это обусловлено ускорением таяния льдов Арктики и Антарктики [2] и ростом числа природных катастроф (например, природных пожаров [3] и ураганов [4]). Такая ситуация создала предпосылки для принятия волевых политических решений по интенсификации внедрения в общий баланс производства тепловой и электрической энергии нетрадиционных экологически чистых, так называемых, возобновляемых источников энергии (ВИЭ) [5,6]. К последним относятся ветровые электростанции [5] и фотоэлектрические преобразователи [6]. 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. Если проанализировать значения EROI [7] для самых современных видов ВИЭ, то можно отметить, что для ветровых электростанций EROI не превышает 3 [7], а для солнечных батарей он может быть меньше 1 (около 0,81 по данным [8]). Другими словами, фотоэлектрические преобразователи, в основном, являются поглотителями энергии, если рассматривать полный цикл «изготовление – работа – утилизация». Можно обоснованно предположить, что будущее энергетики, скорее всего, - гибридная и адаптивная энергетическая система, включающая в себя традиционные (тепловые [9] и атомные [10] электрические станции, обеспечивающие базовую энергетическую нагрузку) и нетрадиционные (ветро-электрогенераторы [11], солнечные батареи [12] или более экзотические – приливные ГЭС [13]) источники энергии. Главным элементом такой системы должны быть высокоёмкие энергонакопители (например, гидроаккумулирующие ГЭС [14], супермаховики [15], механические гравитационные накопители [16], литий-ионные аккумуляторы [17] и др.). Также неотъемлемой частью энергосистемы будущего будут распределители

энергии (на базе вычислительных систем, работающих на самообучающихся алгоритмах [18] с применением распределенных вычислений [19-21]).

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 [22] и сельского хозяйства [23], а также лесной горючий материал [24]). 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 [25]. При ее сжигании формируется диоксид углерода, который не нарушает общего баланса  $\text{CO}_2$  в мировом геохимическом цикле углерода [26]. 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» [27] 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 [28] 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.

Все перечисленные выше преимущества создают предпосылки для активного внедрения биомассы в общий баланс тепло- и электрогенерации. Но при этом необходимо подчеркнуть, что активные попытки использования древесных отходов в качестве топлива (в странах ЕС опыты по сжиганию древесины проводились более чем на 150 ТЭС [29]) не привели к ожидаемым результатам во всех экспериментах. На настоящее время в мире насчитывается не более 20 ТЭС, работающих на древесной биомассе. Последнее обусловлено рядом объективных и субъективных причин.

К объективным относится относительно низкая теплота сгорания биомассы: при сжигании даже самой теплотворной древесины - березы  $Q_c^{bio} \cong 15 \cdot 10^6$  Дж/кг выделяется тепла меньше чем при сжигании самого низкосортного бурого угля ( $Q_c^{lig} = 27 \cdot 10^6$  Дж/кг) [30, 31]. Также стоит сказать, что древесная биомасса, как правило, влажная (на практике максимальная влажность может достигать 80% [32]). Соответственно, сжигание такой биомассы приводит к существенному снижению эффективности работы котельного агрегата.

К субъективным относится проблема логистического обеспечения топливоподачи на ТЭС. Но анализ публикаций последних 10 лет (например, [33-35]), посвященных проблемам использования биомассы в энергетике, показывает, что главной (или одной из главных) проблемой внедрения древесной биомассы является отсутствие общей теории процессов термической подготовки (зажигания и горения) частиц древесной биомассы в условиях высокотемпературного нагрева. Такая теория может позволить существенно упростить процедуру выбора формы и размеров частиц топлива, обеспечивающих малое значение времен задержки зажигания при низких энергозатратах на дробление топлива. Отсутствие теории, обеспечивающей возможность выбора при проведении опытно-конструкторских работ по созданию технологий сжигания древесной биомассы в топках паровых и водогрейных котлов размеров частиц топлива и, соответственно, технологий подготовки древесины к сжиганию,

обусловлено отсутствием экспериментальных данных об основных закономерностях процессов горения частиц древесины.

Также необходимо отметить, что перспективным является использование древесной биомассы в теплоэнергетике не только в виде отходов лесопиления и деревообработки. Такие отходы есть не везде. Вторым источником древесины для сжигания в топках теплоэлектростанций и котельных могут быть специально выращиваемые быстро растущие деревья (например, тополь в России). Выращивание деревьев лиственных пород на специальных плантациях может обеспечить решение двух важных задач охраны окружающей среды. Первая – интенсифицируется процесс поглощения углекислого газа и образование кислорода. Вторая – снижаются выбросы в дымовых газах теплоэлектростанций и котельных оксидов серы, азота и летучей золы по сравнению с выбросами при сжигании любых, даже малосернистых углей. Но в этом случае древесина должна пройти достаточно энергоемкий этап диспергирования. Соответственно, возникает проблема выбора характерного размера щепы, обеспечивающего и эффективное сжигание, и минимальные энергозатраты на дробление древесины.

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 теплоэлектростанций 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 цели были поставлены и решены 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 размеров частиц 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.** Эксперименты проводились с использованием современных средств регистрации характеристик исследованных процессов с малыми методическими погрешностями. Для каждого сочетания контролируемых факторов в эксперименте проводилась серия минимум из 15 опытов. Определялись доверительные интервалы времен термической подготовки частиц древесной биомассы. Результаты экспериментальных исследований подтверждаются их хорошей повторяемостью.

**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 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 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 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 результаты, положения и выводы.

**Связь работы с научными программами и грантами. Исследования проводились в рамках выполнения работ по проектам:**

1. Российского научного фонда (РНФ): 18-79-10015 «Разработка основных элементов теории процессов термической подготовки,

воспламенения и горения смесевых топлив на основе угля и древесины применительно к камерам сгорания котельных агрегатов». Продление 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».

**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).

**Публикации.** Опубликованы три статьи в международных научных журналах, индексируемых базами «Scopus» и «Web of Science»: «Biomass and bioenergy», «Journal of the Energy Institute» и «Renewable Energy».

### 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 диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук.

**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.

**Вторая глава** посвящена описанию методики проведения экспериментальных исследований, подготовке топлива, методу оценки погрешностей результатов экспериментальных исследований.

**В третьей главе** представлены результаты проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесины четырех видов.

Проведен анализ влияния формы и объема частиц древесной биомассы на времена их термической подготовки. Показано, что характерный размер частиц древесины, выполненных в форме куба, не оказывает значимого влияния на характеристики и условия воспламенения, в отличие от других форм (пластины и параллелепипеда). Установлено, что при идентичных объемах частицы в форме пластины зажигаются значительно быстрее частиц, выполненных в виде куба и прямоугольного параллелепипеда. Установлено влияние расстояния между частицами древесины на характеристики их совместного зажигания.

Установленные в экспериментах времена термической подготовки частиц древесины показывают, что анизотропия свойств древесины не оказывает значимого влияния на характеристики зажигания.

**В заключении** приведены основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕОРИИ И ПРАКТИКИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА В ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКЕ

## 1.1 Экономические предпосылки применения биомассы в энергетике

Анализ энергетической политики, проводимой правительствами многих развитых государств (Швеция, Германия и др.) [36], показывает, что в долгосрочной перспективе (по прогнозам специалистов ~ 30-40 лет) доля биомассы, как энергоносителя в производстве тепловой и электрической энергии может составить до 30%. Это обусловлено существенными и достаточно очевидными экологическими и экономическими преимуществами её по сравнению с другими видами возобновляемых источников энергии. Во-первых, биомасса является единственным возобновляемым в короткий срок (в геологических масштабах времени [37]) топливом [38]. Например [39], период времени роста до высоты 15-20 м такого перспективного (по критериям биоэнергетики) вида дерева как тополь составляет около 50 лет. Также стоит сказать, что древесная биомасса существенно распространена на всей планете [40]. Кроме того, в качестве топлива или добавки к топливу (например, углю) тепловых электростанций целесообразно использовать древесину деревьев малого периода роста. Даже за малое время роста они могут вырабатывать большие объёмы кислорода и, соответственно, поглотить большие объёмы углекислого газа. То есть плановое выращивание древесной биомассы (особенно быстрорастущих пород) позволяют решать сразу несколько задач экологической безопасности - замена угля, поглощение  $\text{CO}_2$ , выработка  $\text{O}_2$ .

Во-вторых, древесина содержит очень мало серы, поэтому при её сжигании практически не образуется токсичных оксидов серы ( $\text{SO}_x$ ). Исследования [41] показали, что при сжигании биомассы в составе угольно-древесных композитов существенно снижаются также выбросы оксидов азота ( $\text{NO}_x$ ) и диоксида углерода ( $\text{CO}_2$ ). При этом установлено [41], что

добавление биомассы к углю даже приводит в ряде случаев (механизм этого процесса пока не установлен) к повышению энергетической и экологической эффективности сжигания угля.

В-третьих, использование биомассы может позволить существенно расширить сырьевую базу тепловых электрических станций и, соответственно, снизить цену за единицу электроэнергии для конечного потребителя [42].

## 1.2 Основная проблематика исследований

Необходимо отметить, что в настоящее время разработано два основных способа энергетического использования биомассы: её прямое сжигание в топках паровых и водогрейных котлов [43] и газификация [44] (получение газообразных продуктов пиролиза-СО, СН<sub>4</sub>, Н<sub>2</sub>, С<sub>n</sub>Н<sub>m</sub> и древесного кокса). При этом можно обоснованно сделать вывод, что прямое сжигание является, скорее всего, не только самым простым, но и самым перспективным (в ближайшем будущем) способом использования биотоплива.

Разработано несколько технологических решений по сжиганию биомассы: пылевидное горение в топках котельных агрегатов [45]; сжигание в циркулирующем кипящем слое [46]; слоевое сжигание крупных древесных гранул [47]. При этом достаточно очевидно, что зажигание и горение частиц древесной биомассы для всех вышеперечисленных способов происходит в условиях большего или меньшего влияния этих частиц друг на друга (среднее расстояние между частицами может существенно различаться вследствие неоднородности характеристик потока высокотемпературной окислительной среды). Но на настоящее время в мировой научной периодике практически нет публикаций с результатами анализа влияния расстояния между частицами древесной биомассы на длительность периода их термической подготовки.

К настоящему времени опубликовано достаточно много работ, посвященных проблемам использования биомассы в энергетике. Но анализу влияния вида типичных лиственных и хвойных пород древесины и размеров частиц на характеристики и условия процессов термической подготовки частиц биомассы посвящено мало работ. Как правило, большинство ученых решают задачи улучшения характеристик сжигания (деинтенсификация золотого налета на трубных поверхностях котельного агрегата [48], снижение выбросов оксидов азота в газообразных продуктах горения [49] или общей концентрации нитратов в продуктах горения [50], уменьшение концентрации летучей золы [51]) при совместном сжигании угля с древесной биомассой. При этом сами процессы тепло- и массопереноса, протекающие при интенсивных фазовых и термохимических трансформациях, практически не анализируются. Можно отметить лишь несколько работ (например [52, 53]), в которых приведено описание этих процессов для частиц древесной биомассы применительно к камерам сгорания парогенераторов. В [54] приведены результаты обширных исследований процессов горения древесины применительно к топочным устройствам котельных агрегатов. В [55] показано, что увеличение концентрации кислорода в зоне горения приводит к существенной интенсификации образования оксидов азота. По мнению авторов [55], это в первую очередь обусловлено интенсивным взаимодействием топливных оксидов (выходящих совместно с летучими в период термического разложения в виде синильной кислоты) с кислородом воздуха. При этом показано [55], что при беспламенном горении биомассы концентрация оксидов азота в продуктах сгорания значительно меньше по сравнению со сжиганием такой же биомассы в условиях пламенного горения.

Можно отметить работу [56], в которой приведены результаты экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесной биомассы в условиях высокотемпературного нагрева. В [57] проанализировано влияние концентрации основных компонентов биомассы (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина) на характеристики и условия



термической подготовки частиц этого топлива. Установлено, что максимальная температура горения зависит в первую очередь от содержания лигнина в биомассе. При этом минимальная температура начала горения ( $T_{ign}$ ) зависит от концентрации целлюлозы в древесине. Также показано, что содержание лигнина в биомассе значительно влияет на режим термической подготовки: при высокой концентрации лигнина зажигание происходит в гетерогенном режиме, при сравнительно низкой его концентрации в газофазном.

В [58] приведены результаты экспериментальных исследований процесса термической подготовки лигноцеллюлозной биомассы. Однако в [58] не определены характеристики и условия этого процесса для частиц древесной биомассы, также не проведен анализ влияния форм и размеров фрагментов биомассы на эти характеристики и условия. В [59 - 61] приведены результаты математического моделирования процессов воспламенения частиц древесной биомассы в условиях радиационно-конвективного нагрева. Установлены характерные времена термической подготовки.

Интересные результаты по анализу выхода окиси углерода при горении биомассы представили авторы [62]. Установлены подробные кинетические схемы взаимодействия древесной биомассы с высокотемпературной окислительной средой. Показано, что радикалы гидроксильной группы OH играют определяющую роль в регулировании процесса термической подготовки. Также можно отметить замечательную работу [63] в которой приведены результаты экспериментальных исследований процессов термической подготовки древесных гранул в условиях плазменной подсветки. Показано, что скорость потока окислителя оказывает наибольшее влияние на характеристики этих процессов при плазменной подсветке последних. Установлена [63] высокая эффективность плазменной подсветки по сравнению с классической технологией сжигания древесных гранул.

Но анализ наиболее значимых публикаций по проблеме термической подготовки частиц древесной биомассы [48-63] показывает, что до настоящего времени не проведено систематических экспериментальных исследований механизмов физико-химических процессов, предшествующих началу горения. В то же время знания о закономерностях процессов термической подготовки частиц древесины являются основой приведения прогностического моделирования работы топочных устройств, по результатам которого можно обосновать выбор конструктивных характеристик сжигающего биомассу котельного агрегата и его режимы работы в зависимости от вида топлива.

### **1.3 Современное состояние теории и практики процессов термической подготовки частиц биомассы.**

Опубликовано достаточно много работ (например, [64-66]) с описанием результатов экспериментальных и теоретических исследований процессов термической подготовки частиц древесной биомассы в условиях их высокотемпературного нагрева в окислительной среде. Но все опубликованные статьи посвящены исследованиям процессов термической подготовки одной частицы биомассы. Зажигание же группы частиц (счетного множества) биомассы практически не исследовалось. Стоит сказать, что, зная характеристики и условия зажигания одной частицы древесины, можно разработать теорию этого процесса для пылевоздушного потока, приняв значение  $t_{ign}$  за первое приближение. Однако, при термической подготовки группы частиц биомассы, возможно, как тепловое, так и термохимическое взаимодействие этих частиц между собой. Поэтому логичным является вопрос: «Следует ли учитывать это взаимодействие при оценке времён задержки?».

В [67] приведены результаты экспериментальных исследований процессов зажигания и горения древесных частиц в горелке Маккена.

Определены [67] времена термической подготовки при различных температурах и концентрациях окислителя. С использованием высокоскоростной видеосъемки установлено, что зажигание частиц биомассы происходило, как правило, в газовой фазе. При этом увеличение концентрации кислорода в воздухе не приводило к существенному снижению времён термической подготовки (то есть окислитель был всегда в избытке). Но в [67] исследовались процессы, происходящие при нагреве только одной частицы биомассы диаметром 6 мм. В тоже время в условиях топочного пространства происходит сжигание большой (сотни и тысячи) совокупности частиц древесины. Поэтому применение результатов [67] при прогностическом моделировании работы топочного устройства котельного агрегата, работающего на биомассе, скорее всего, не всегда обосновано.

В [68] по результатам экспериментальных исследований процесса термической подготовки биомассы в виде пеллет цилиндрической формы диаметром 9 мм и длиной до 10 мм в потоке воздуха проведен анализ влияния концентрации окислителя (кислорода воздуха – 21%; 30%; 40%; 50% и 100%) на характеристики и условия зажигания. Одиночные гранулы из смеси мелкодиспергированной сосны и рисовой шелухи крепились на термопаре диаметром 80 мм. Но такие пеллеты слишком большие для сжигания в пылевидном состоянии. Только в слоевом виде возможно их горение. Но слоевой способ сжигания применяется только для водогрейных котлов малой мощности (до 1,5 МВт). По результатам экспериментов [68] установлены характерные времена процессов термической подготовки частиц древесины при различных температурах внешней среды и концентрациях окислителя. Также установлено, что влияние температуры окислителя на характеристики и условия протекания этого процесса более значительно, чем скорости обтекания частиц биомассы воздухом.

В [69] приведены результаты теоретического исследования зажигания одной частицы биомассы. Но возможность применения результатов [69] при проведении прогностического моделирования этих процессов для большой

совокупности частиц древесной биомассы в топках котельных агрегатов пока не обоснована.

В [70] по результатам экспериментальных исследования процессов термической подготовки одиночных частиц биомассы (древесины) и битуминизированного угля с использованием высокоскоростной видеосъемки показано существенное отличие характеристик этих процессов для частиц угля и древесины. Аналогично [69] проанализировано влияние концентрации кислорода в воздухе на характеристики и условия воспламенение частиц топлив.

#### **1.4 Выводы по первой главе**

1. Публикационная активность по проблеме использования древесины в качестве основного топлива в энергетике за последние годы говорит о том, что данное направление исследований является весьма актуальным.

2. Анализ результатов экспериментальных исследований, процессов термической подготовки древесных топлив показал, что перспективным (а может и самым перспективным) возобновляемым источником энергии является древесная биомасса (отходы деревопереработки и лесопиления, 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: углеродная нейтральность, распространенность, низкая стоимость и отсутствие в составе серы. Биомасса является самым надежным экологичным и экономически выгодным ВИЭ

3. В литературе отсутствуют сведения о влиянии конфигурации и размеров частиц древесной биомассы на условия и характеристики процесса термической подготовки таких частиц.

4. Нет данных об условиях влияния (или отсутствия влияния) соседних частиц на времена термической подготовки одиночной частицы.

5. Анализ основных публикаций по теме диссертационной работы показал, что одной из ключевых проблем, сдерживающих использование древесной биомассы в промышленной теплоэнергетике, является отсутствие достоверных данных о закономерностях зажигания и горения древесных топлив. По этой причине древесина в качестве топлива пока не широко применяется на предприятиях промышленной теплоэнергетики.

## ГЛАВА 2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

### 2.1. Подготовка топлива

С целью подготовки топлива для экспериментальных исследований проводился последовательный ряд технологических операций, включающий в себя этапы:

1. Подготовка частиц древесины. Последние вырезались при помощи лазерного станка RABBIT NX-1290 из монолитного сухого фрагмента древесины больших размеров, относительная влажность которого составляла 5-8%. В дальнейшем при помощи шлифовального и фрезерного устройств проводилась шлифовка поверхности частиц и придание им соответствующей формы и нужного размера.

2. При проведении экспериментов с частицами разной формы в качестве модельных приняты три типичные конфигурации: параллелепипед, куб и пластина. При этом характерные размеры варьировались в широком диапазоне значений при соблюдении условия одинакового (для частиц всех форм) объема  $V = idem$  (64, 128, 192, 640 и 960 мм<sup>3</sup>) для каждой отдельной серии экспериментов. В результате формировались частицы древесной биомассы одинаковых масс, но с существенно отличающимися площадями поверхностей теплообмена. Характерный поперечный размер прямоугольного параллелепипеда (рисунок 2.1) составлял  $\delta = 4$  мм, длина варьировалась в широком диапазоне ( $2\delta$ ,  $3\delta$ ,  $10\delta$  и  $15\delta$ ). В соответствии с объемом частиц в форме параллелепипеда вычислялись характерные размеры частицы в форме куба. Размер пластинообразной частицы по координате  $z$  (толщина) составлял 1 мм, по координате  $x$  45 мм (ширина), третий размер (длина) определялся в соответствии с условием равенства объемов частиц первых двух форм  $V = x \cdot y \cdot z$  (рис.2.1). На рисунке 2.1 приведены характерные размеры исследовавшихся частиц древесной биомассы.

## **2.2. Исследованные материалы**

При выборе размеров частиц учитывалась возможность сжигания в топках паровых и водогрейных котлов диспергированной древесины с разным характерным размером частиц. Наиболее простым вариантом использования древесной биомассы в качестве топлива в теплоэнергетике являются отходы лесопиления и деревообработки (опилки). Характерный размер частиц, образующихся после пиления древесины, зависит от размеров зубьев пилы и составляет в условиях пиления наиболее широко используемых хвойных пород древесины от 0,5 мм до 2 мм. Сухие частицы древесины таких размеров, как правило, начинают гореть с характерными временами задержки зажигания не более 0,5с.

Но большое значение для практики имеют экспериментальные данные о временах термической подготовки групп частиц относительно больших (3-6 мм) размеров, которые образуются в условиях специального дробления древесины (как правило, не деловой), предназначенной для использования в качестве топлива котельных установок большой и малой энергетики.

## **2.3. Конфигурации взаимного расположения частиц для воспроизведения условий их нагрева в топочном пространстве**

Несмотря на большое внимание, уделяемое анализу влияния большой группы факторов, характеризующих частицы древесной биомассы, на характеристики и условия их термической подготовки, остается еще много нерешенных проблем в этой области знаний: например, оценка совокупного влияния формы и линейных размеров частицы биомассы (или другими словами гомеоморфности), выполненной в виде многогранника (при условии идентичности объемов) на характеристики и условия процесса термической подготовки (как видно из анализа в основном изучены процесса горения). Целью работы является проведение по результатам экспериментальных исследований анализа влияния форм и размеров частиц и их совокупности

(другими словами гомеоморфности поверхности) частицы древесной биомассы на характеристики процесса термической подготовки в условиях высокотемпературного нагрева в окислительной среде. Выбор главной функции цели продиктован необходимостью принятия во внимание того фактора, что при сжигании специально заготовленной древесины большие объемы электроэнергии затрачиваются на дробление, в отличие от типичных отходов лесопиления и деревообработки, характерные размеры которых составляют 1-2 миллиметра, как правило. Эти энергозатраты заметно снижают эффективность биоэнергетики. Поэтому целесообразно установление функциональных связей характерных размеров частиц древесины и времён процесса их термической подготовки при различных конфигурациях частиц. Целесообразно проводить дробление древесины до предельно допустимых максимальных размеров частиц, обеспечивающих их устойчивое зажигание. Задачи минимизации затрат энергии на процессы подготовки твердого топлива к сжиганию всегда были важными и остаются актуальными в настоящее время.

Необходимо уточнить, что терминологически все три варианта форм исследовавшихся частиц древесины сосны являются параллелепипедами (рисунок 2.1). Разделение, принятые в диссертации, сделано в связи с тем, что в реальной практике возможно использование разных технологий дробления (другими словами, измельчения) древесины на этапе её механической подготовки к сжиганию. Возможны разные варианты конфигурации образующихся после дробления на мелкие фрагменты стволов деревьев при целенаправленной заготовке древесины для сжигания в топках паровых и водогрейных котлов. Поэтому, обобщая возможные результаты такого дробления можно условно разделить все итоговые конфигурации конечных фрагментов на три группы, которые при описании результатов и использовались.



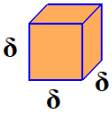
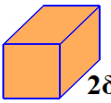
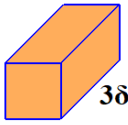
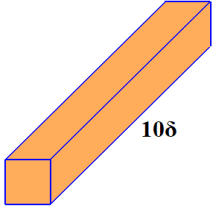
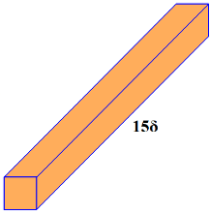
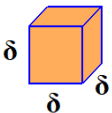
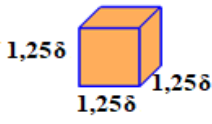
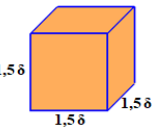
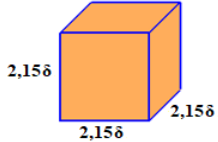
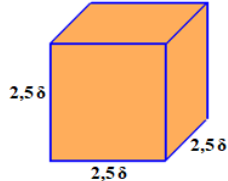
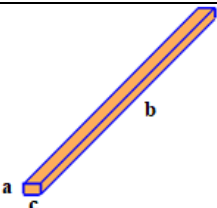
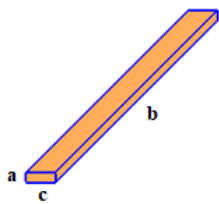
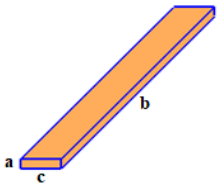
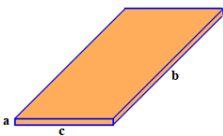
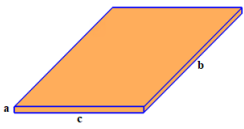
<b>I</b>	<b>II</b>	<b>III</b>	<b>IV</b>	<b>V</b>
$V=64 \text{ мм}^3$	$V=128 \text{ мм}^3$	$V=192 \text{ мм}^3$	$V=640 \text{ мм}^3$	$V=960 \text{ мм}^3$
				
<b>I.1</b> $S=96 \text{ мм}^2$	<b>II.1</b> $S=160 \text{ мм}^2$	<b>III.1</b> $S=224 \text{ мм}^2$	<b>V.1</b> $S=672 \text{ мм}^2$	<b>VI.1</b> $S=995 \text{ мм}^2$
				
<b>I.2</b> $S=96 \text{ мм}^2$	<b>II.2</b> $S=150 \text{ мм}^2$	<b>III.2</b> $S=216 \text{ мм}^2$	<b>V.2</b> $S=486 \text{ мм}^2$	<b>VI.2</b> $S=600 \text{ мм}^2$
				
<b>I.3</b> $S=225 \text{ мм}^2$	<b>II.3</b> $S=352,2 \text{ мм}^2$	<b>III.3</b> $S=476 \text{ мм}^2$	<b>V.3</b> $S=1396,4 \text{ мм}^2$	<b>VI.3</b> $S=2022 \text{ мм}^2$

Рисунок 2.1 - Конфигурации частиц.

Где  $S$ ,  $V$  – площадь поверхности и объем частицы древесины, соответственно;  $\delta$  – характерный размер кубической частицы  $=4$  мм;  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – толщина, длина и ширина пластины ( $a=1$  мм) соответственно.

При прямом сжигании частиц любой биомассы (в том числе и древесной) возникает вопрос о влиянии формы или ориентации таких частиц в топочном пространстве относительно вектора потоков излучения, являющегося основным механизмом нагрева топлива в топочном пространстве [71]. Так, например, при использовании отходов лесопиления и деревообработки основным вариантом конфигурации частиц древесины является форма частиц опилок - многогранники малых (1-2 мм) характерных размеров. В этом случае их положение относительно типичных экранов не имеет большого значения, так как какой-бы гранью многогранника частица не была обращена к поверхности излучения, интенсивность её нагрева будет

почти идентичной [72].

Но не только отходы лесопиления и деревообработки могут использоваться как топливо (вместо угля) в теплоэнергетике. Для многих государств, например, Юго-Восточной Азии, климат которых обеспечивает быстрый рост деревьев очень многих пород древесины [73], перспективно специальное выращивание деревьев лиственных пород (они, как правило, растут быстрее хвойных) для последующей вырубки и сжигания в топках котельных установок. В этом случае необходимо специальное пиление, расщепление и дробление древесины [74]. Но на такие энергоёмкие процедуры необходимо достаточно значимые затраты энергии. Поэтому актуальна задача минимизации этих затрат, решение которой возможно, в том числе, и в результате выбора размеров и конфигурации отдельных элементов щепы, образующихся после процесса трансформации стволов деревьев в совокупность щепок разной конфигурации. В этом случае возможна их разная ориентация в потоке высокотемпературных газов относительно направления потока теплового излучения топочных экранов (рисунок 2.2). Соответственно, условия нагрева и времена задержки зажигания каждой из большой совокупности частиц (точнее щепок) могут зависеть от их конфигурации и ориентации в потоке.

Кроме того, слоистая структура многих пород древесины [75] приводит к анизотропии их теплофизических и фильтрационных свойств, которые, как известно из общей теории зажигания конденсированных веществ [76], 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.

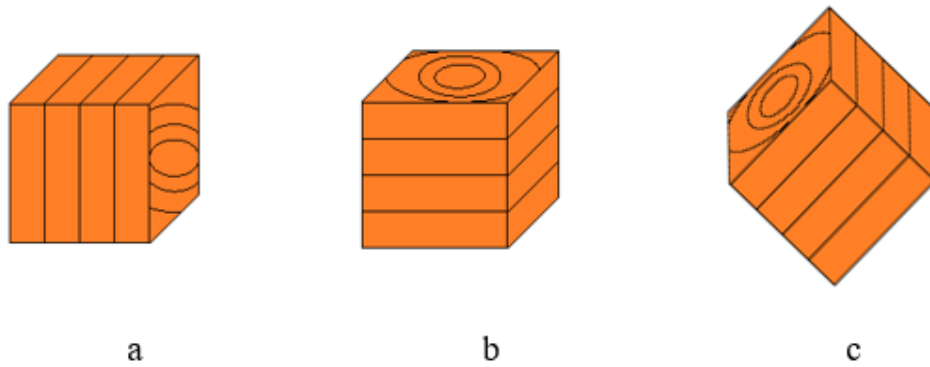


Рисунок. 2.2 - Варианты конфигурации частиц древесины в пространстве нагрева в зависимости от положения волокон

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 2.2 приведены три реализованные в экспериментах ориентации частицы древесной биомассы.

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 (Рисунок 2.3).

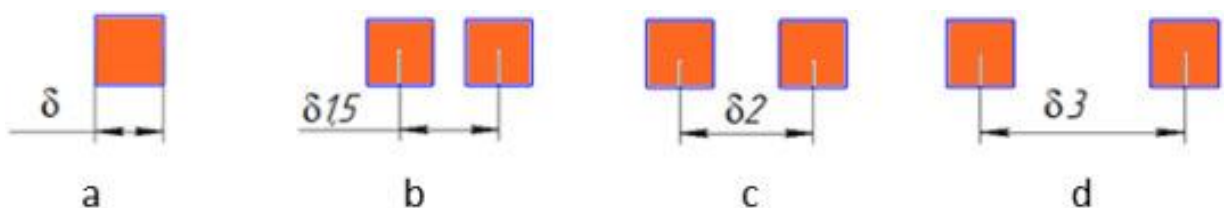


Рисунок 2.3 - Варианты сочетаний частиц и расстояний между ними

Значение для практики имеют экспериментальные данные о временах термической подготовки групп частиц относительно больших (3-6 мм) размеров, которые образуются в условиях специального дробления древесины (не деловой), предназначенной для использования в качестве топлива котельных установок большой и малой энергетики. По этим причинам эксперименты проведены с частицами древесины, характерные размеры которых составляли 3,5 мм (рисунок 2.4 а-d) и 6 мм (рисунок 2.4 е-h).

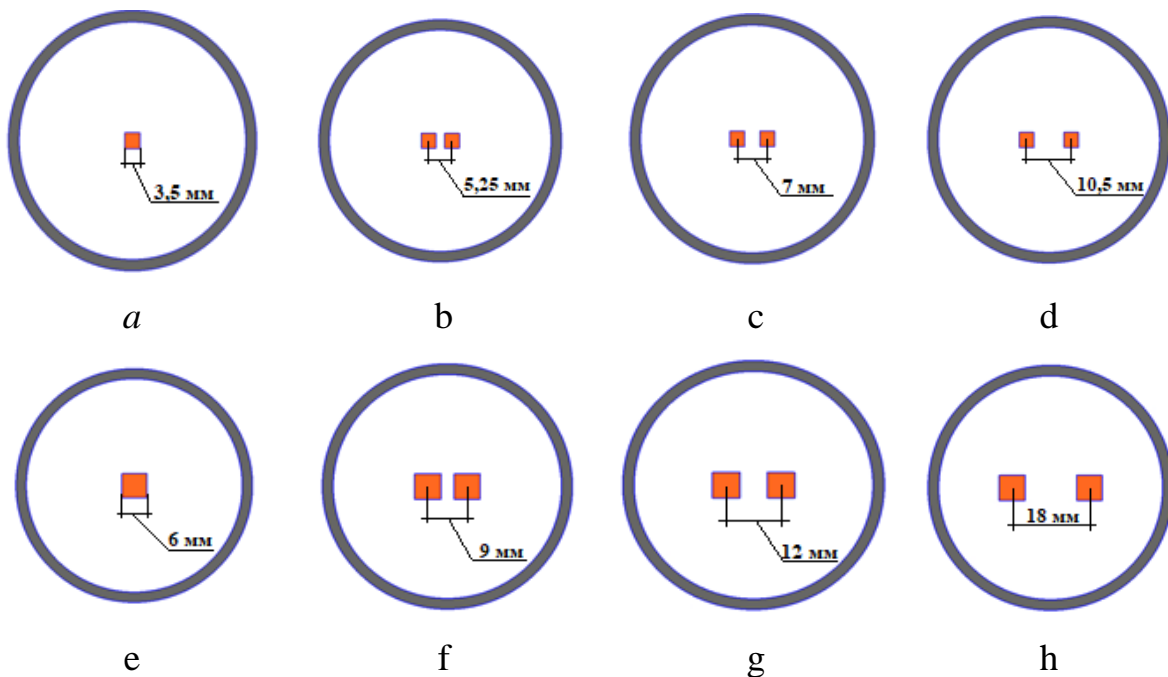


Рисунок 2.4 - Варианты положений частиц в экспериментах при межосевом расстоянии  $l$ : а -  $l=0$  мм; б -  $l=5,25$  мм; в -  $l=7$  мм; д -  $l=10,5$  мм; е -  $l=6$  мм; ф -  $l=9$  мм; г -  $l=12$  мм; h -  $l=18$  мм.

#### 2.4. Методика проведения экспериментов

Разработана методика проведения экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц древесной биомассы с воспроизведением условий, в наибольшей степени соответствующих

условиям топок котельных агрегатов.

Экспериментальные исследования проведены на стенде, схема которого показана на рисунке 2.5. Основная часть экспериментального стенда представляет собой полу цилиндрическую камеру сгорания, заполненную воздухом. Цилиндр выполнен из тугоплавкого жаростойкого материала – корунда ( $Al_2O_3$ ). С целью формирования внутри камеры условий нагрева, соответствующих топочным устройствам котельных агрегатов (диапазон температур окислителя  $T_g=873 - 1273K$ ), на внешнюю поверхность цилиндра крепился электрический нагреватель (нихромовая проволока). Последний представлял собой систему из трех автономных нагревательных секций. Температура в камере горения измерялась тремя хромель-алюмелевыми термопарами. Контроль и автоматизированное управление тепловым режимом камеры горения осуществлялись системой, состоящей из трех подсистем «нагреватель – регулятор – термопара», соединенных через пропорционально-интегрально-дифференцирующий регулятор. Такая конструкция позволяет формировать по всему объему камеры сгорания в начальный период времени (перед проведением каждого отдельного эксперимента) стационарное и однородные температурное поле.

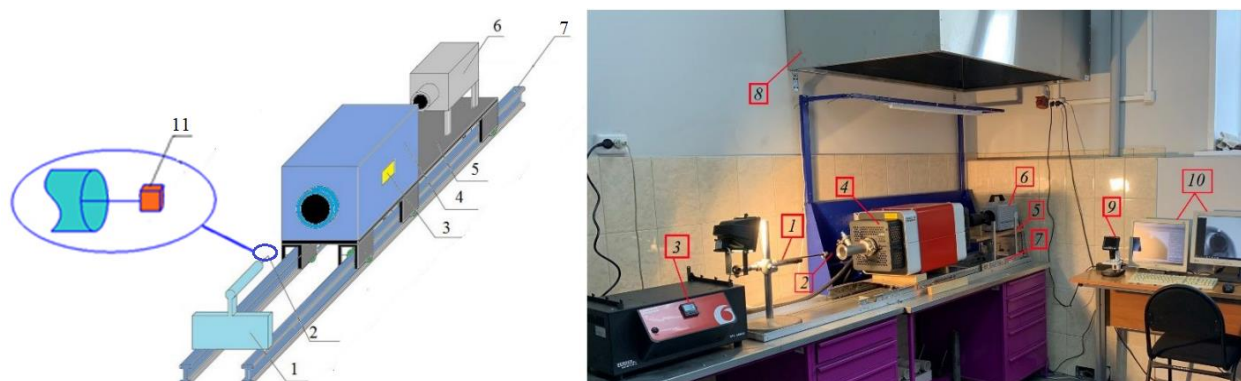


Рисунок 2.5 - Схема экспериментальной установки: 1 – подставка для держателя; 2 – металлический держатель; 3 – табло управления; 4 – высокотемпературная печь; 5 – передвижная платформа; 6 – высокоскоростная видеокамера; 7 – рельсы; 8 – система вентиляции; 9 – микроскоп; 10 – компьютер; 11 – образец древесины.

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.

Для предотвращения тепловых потерь за счет естественной конвекции в экспериментальном боксе торцы керамического цилиндра закрывались теплоизолирующими заслонками. Нагревательный комплекс совместно с камерой сгорания устанавливался в теплоизолированном 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 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. Температура окислителя варьировалась в достаточно широком и при этом типичном для современной котельной техники диапазоне от 873 до 1273 К.

Период времени от начала теплового воздействия (момент ввода частиц в полость цилиндра) до зажигания (появление пламени) считался временем термической подготовки ( $t_{ign}$ ). Для определения временных характеристик процесса проводились серии экспериментов из 15 опытов в идентичных условиях для каждого значения  $T_g$ .

Методом статистической обработки [77] определялась случайная

погрешность измерения  $t_{ign}$ . Количество опытов могло варьироваться (но не менее 10) для достижения необходимой достоверности определения  $t_{ign}$ . Систематическая погрешность определения основных измеряемых параметров ( $T_g$ ,  $t_{ign}$ ) составляла не более 5 %.

При проведении экспериментальных исследований влияния расстояния между частицами древесины на характеристики процесса их термической подготовки (рисунок 2.3) в экспериментах использовался стенд, приведённый на рисунке 2.5, но с видоизменённым держателем (рисунок 2.6).

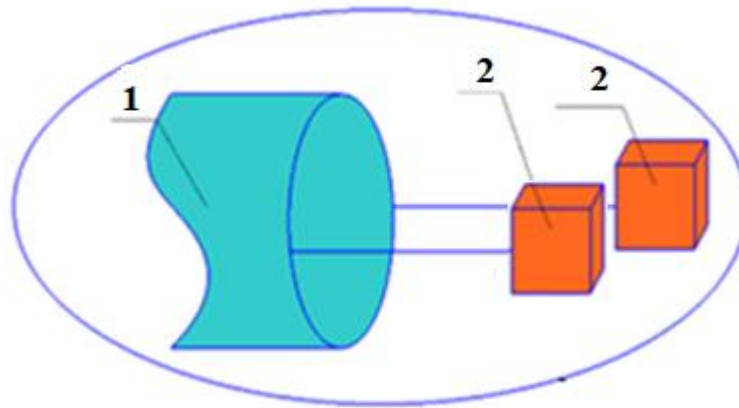


Рисунок 2.6 - Держатель для двух частиц топлива

1 – металлический держатель; 2 – частица древесины;

В таблице 2.3 приведены систематические погрешности основных использовавшихся средств измерений (неопределённости по новой терминологии).

Таблица 2.1 - Погрешности средств измерений

Физическая величина	Средство измерения	Погрешность прибора
Температура окислителя ( $T_g$ )	Термический преобразователь (ТХА)	$\pm 0,004 \cdot T_g$
Расстояние между частицами топлива	Photron FASTCAM CA4 5	$\leq 4 \%$

Время термической подготовки	Photron FASTCAM CA4 5	$\leq 5 \cdot 10^{-5} \%$
Масса топлива	Аналитические весы VIBRA HT 84RCE	0,0001 г

Для каждого набора значимых контролируемых факторов проводилась серия экспериментов не менее чем из 10 опытов. Для оценки случайных отклонений результатов определяли доверительные интервалы по следующему алгоритму [77]:

1. По результатам проведенных экспериментов определяли средние значения  $t_{\text{ign}}$  ( $\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i$ ), где  $t_i$  – значение времени термической подготовки в одном опыте.

2. После этого рассчитывались среднеквадратичные отклонения серии измерений  $S_{\bar{x}}^n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{t} - t_i)^2}{n \cdot (n-1)}}$ .

3. Далее определяли доверительный интервал времен термической подготовки ( $\Delta t = t(\alpha, n) \cdot S_{\bar{x}}^n$ ), где  $t(\alpha, n)$  – коэффициент Стьюдента. Доверительные интервалы в проведенных экспериментах при доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  составляла не более  $\pm 10,4 \%$ .

4. После вычисления доверительных интервалов, выполняли отбраковку промахов (значений времен, не входящих в доверительный интервал).

5. После исключения промахов, проводили дополнительную серию экспериментов, чтобы их общее число было не менее 10 опытов.

## 2.5. Выводы по второй главе

Разработаны методики проведения экспериментальных исследований по изучению времен термической подготовки частиц древесной биомассы в



условиях, соответствующих топочным пространствам котельных агрегатов промышленной теплоэнергетики.

### ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ДРЕВЕСНОГО ТОПЛИВА

#### 3.1. Влияние формы и размеров частиц древесной биомассы на характеристики процесса термической подготовки

Во введении отмечалось, что при использовании в качестве топлива в теплоэнергетике не отходов обработки деловой древесины, а специально выращиваемой (или заготавливаемой) древесины хвойных пород необходимо решить две задачи. С одной стороны – частицы древесины должны быть минимального размера, чтобы обеспечить минимальное время термической подготовки. Но, с другой стороны, размеры частиц должны быть максимально приемлемыми, чтобы минимизировать затраты энергии на дробление исходной древесины. Поэтому одной из основных задач биоэнергетики является установление зависимостей времён термической подготовки от размеров и формы частиц древесины.

На рисунках 3.1-3.3 приведены типичные кадры процессов термической подготовки частиц древесной биомассы с характерным размером  $\delta=4$  мм при температуре внешней среды  $T_g=1073\text{K}$ . Можно отметить, что зажигание частиц древесной биомассы всех форм протекает в газовой фазе. При этом зоны расположения первого локального очага горения (или зоны воспламенения) для каждой формы разные. Можно отметить, что в условиях относительно низких температур внешней среды, зона зажигания частиц, выполненных в форме прямоугольного параллелепипеда локализуется, как правило, вблизи торцевой поверхности. Последнее обусловлено, скорее всего тем, что эта зона нагревается значительно быстрее, по сравнению с основным слоем топлива, вследствие того, что на торцы частицы-параллелепипеда падает такой же тепловой поток, что и на другие грани, но теплоотвод вглубь частицы с торцевых поверхностей минимален. В результате тепло в торцевых частях

аккумулируется значительно быстрее и, соответственно, быстрее растет температура.

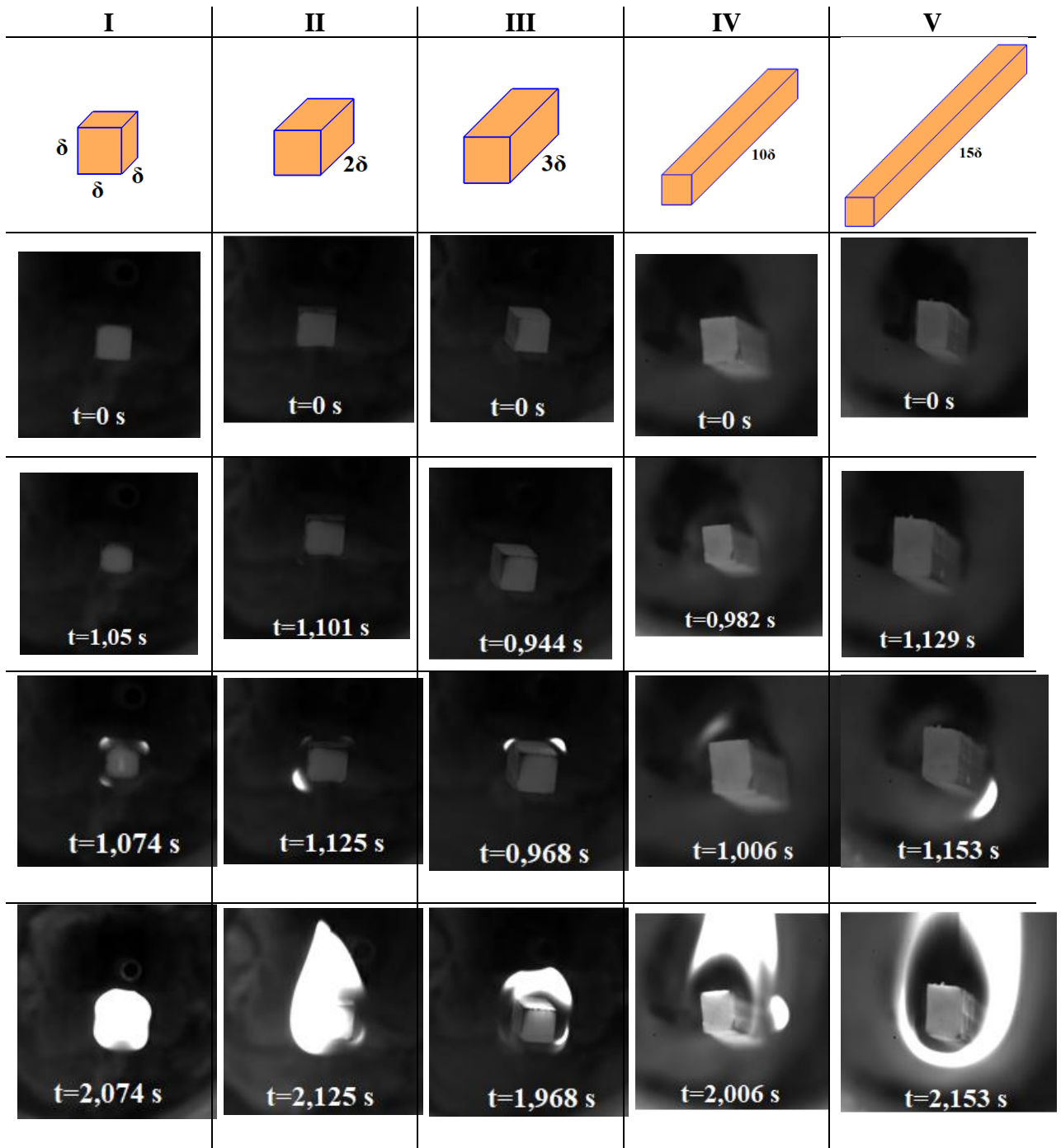


Рисунок 3.1 - Типичные кадры видеोगраммы, иллюстрирующей протекание процессов термической подготовки частиц древесной биомассы в форме прямоугольного параллелепипеда при нагреве последних в окислительной среде при температуре  $T_g=1073\text{K}$  (вид с торца)

Инициирование горения кубических частиц (рисунок 3.2) вне зависимости от размеров последних, как правило, начинается в районе ребер.

Это обусловлено тем, что такие точки являются своеобразными концентраторами тепловых потоков. Соответственно, ребра и углы куба нагреваются значительно быстрее других поверхностей частицы. Скорее всего, по этой причине размер частицы в форме куба не оказывает существенного влияния на времена термической подготовки. Этот результат экспериментов достаточно хорошо согласуется с результатами теоретических [78] и экспериментальных [79] исследований процессов зажигания одиночных частиц древесной биомассы.

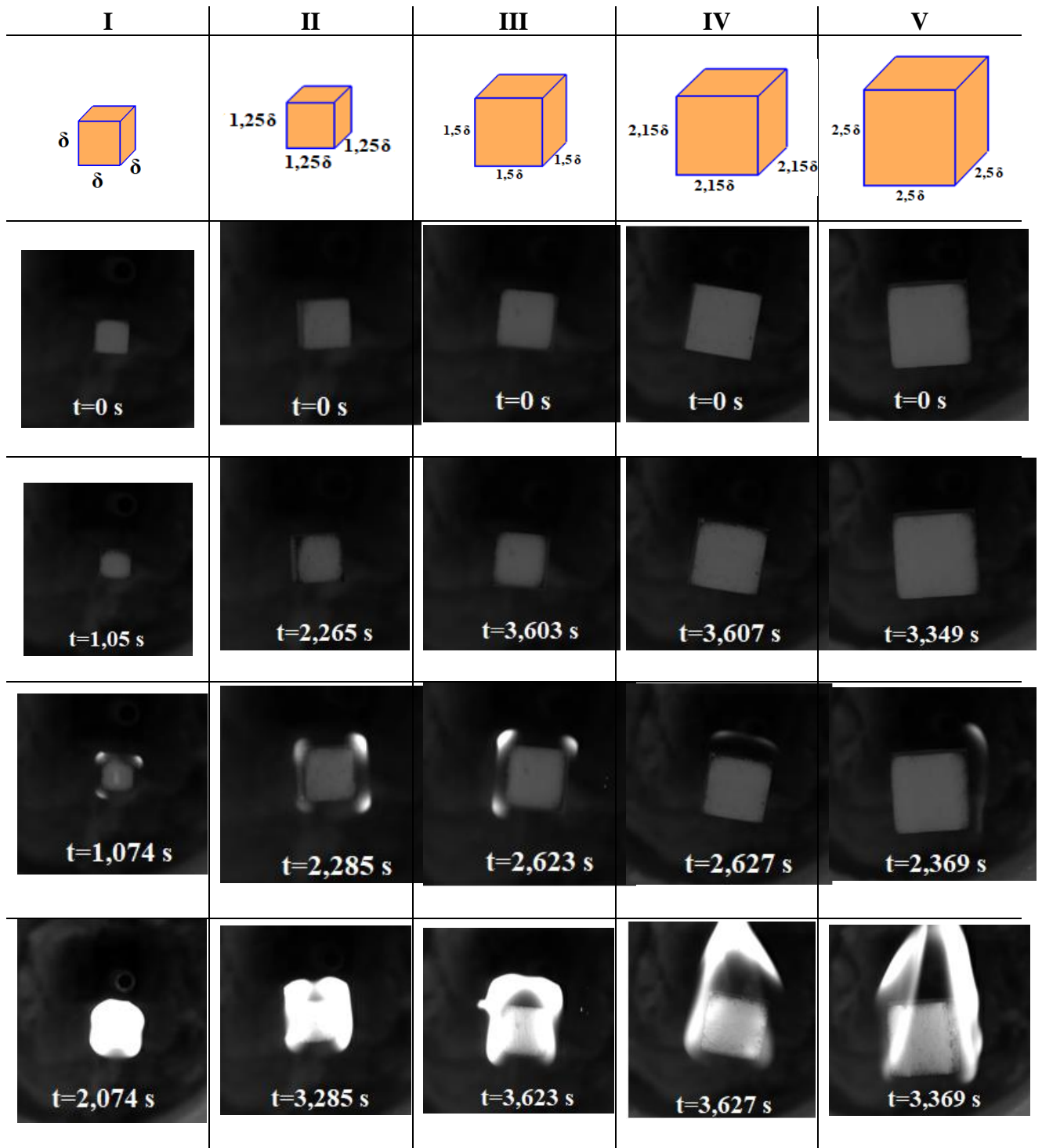


Рисунок 3.2 - Типичные кадры видеозаписей, иллюстрирующие протекание процессов термической подготовки частиц древесной биомассы в форме куба при нагреве последних в окислительной среде при температуре  $T_g=1073\text{K}$ .

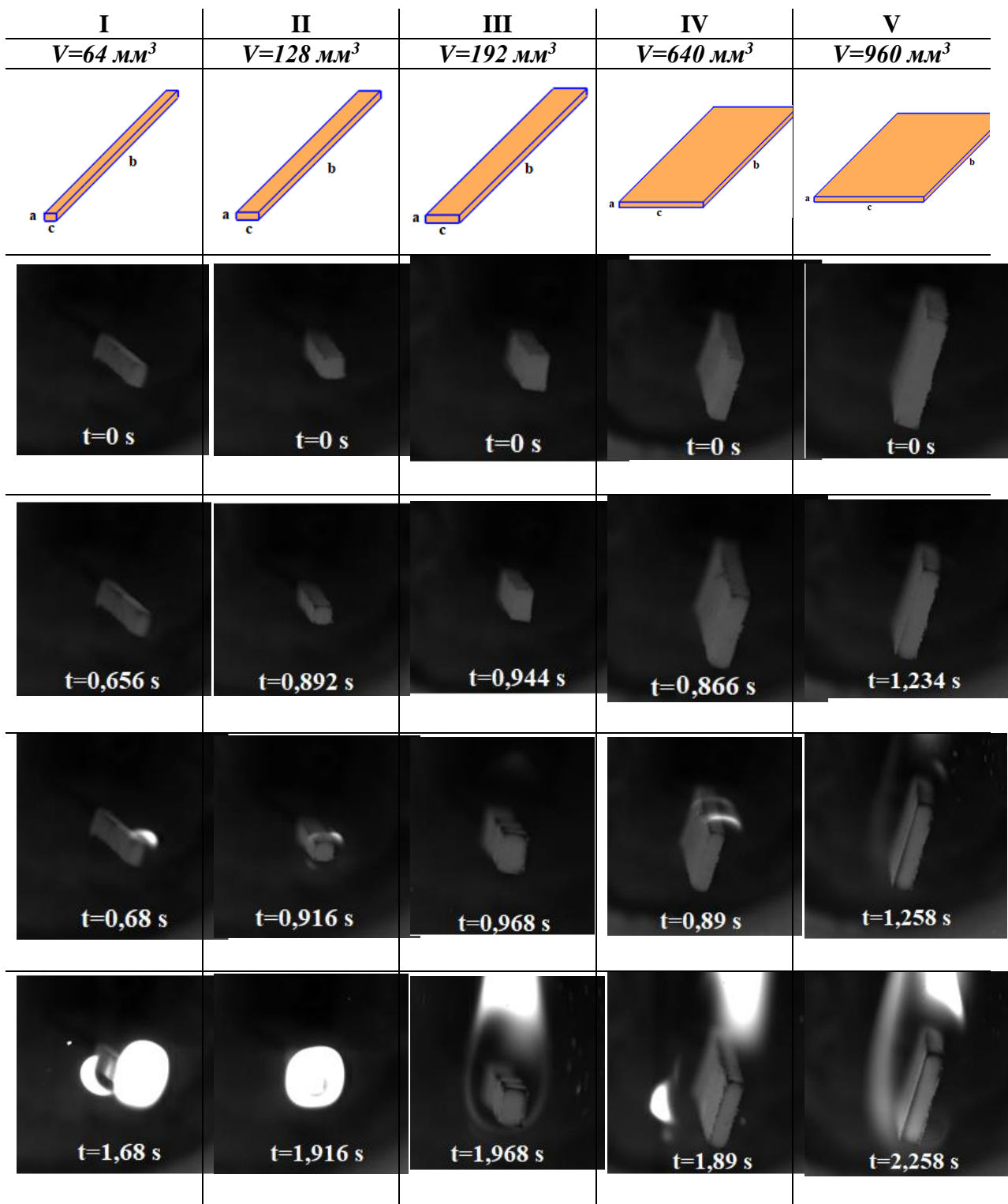


Рисунок 3.3 Типичные кадры видеозаписи, иллюстрирующей протекание процессов термической подготовки частиц древесной биомассы в форме пластины при нагреве последних в окислительной среде при температуре  $T_g=1073\text{K}$  (вид с торца)

Анализ кадров типичной видеозаписи экспериментов с образцами в форме пластины (рис.3.3) показывает, что зажигание пластинообразных частиц древесной биомассы происходит, как правило, по всей поверхности частицы

(рисунок 3.3). Последнее обусловлено тем, что такая пластина прогревается с одинаковой интенсивностью практически по всему объему (точнее по приповерхностным слоям всех сторон частицы).

На рисунках 3.4 а-с приведены зависимости  $t_{ign}(T)$  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  $t_{ign}$  частиц древесины кубической формы при одних и тех же температурах среды заметно больше  $t_{ign}$  частиц-параллелепипедов и частиц-пластин идентичного объема. Эти закономерности проявляются устойчиво. Отклонение значений  $t_{ign}$  частиц разной формы значительно (в несколько раз) превышает доверительные интервалы определения времен термической подготовки. Поэтому целесообразно сформулировать гипотезу о причинах таких отличий, исходя из анализа физики комплекса процессов, протекающих при газофазном зажигании частиц древесной биомассы.

Можно отметить, что, несмотря на достаточно большое содержание кислорода в древесине (от 30% до 45% [80]) зажигание всех частиц (независимо от их формы и размеров) происходило в газовой фазе на некотором удалении от поверхности частицы, как правило, в окрестности угловых точек (рисунки 3.1-3.3).

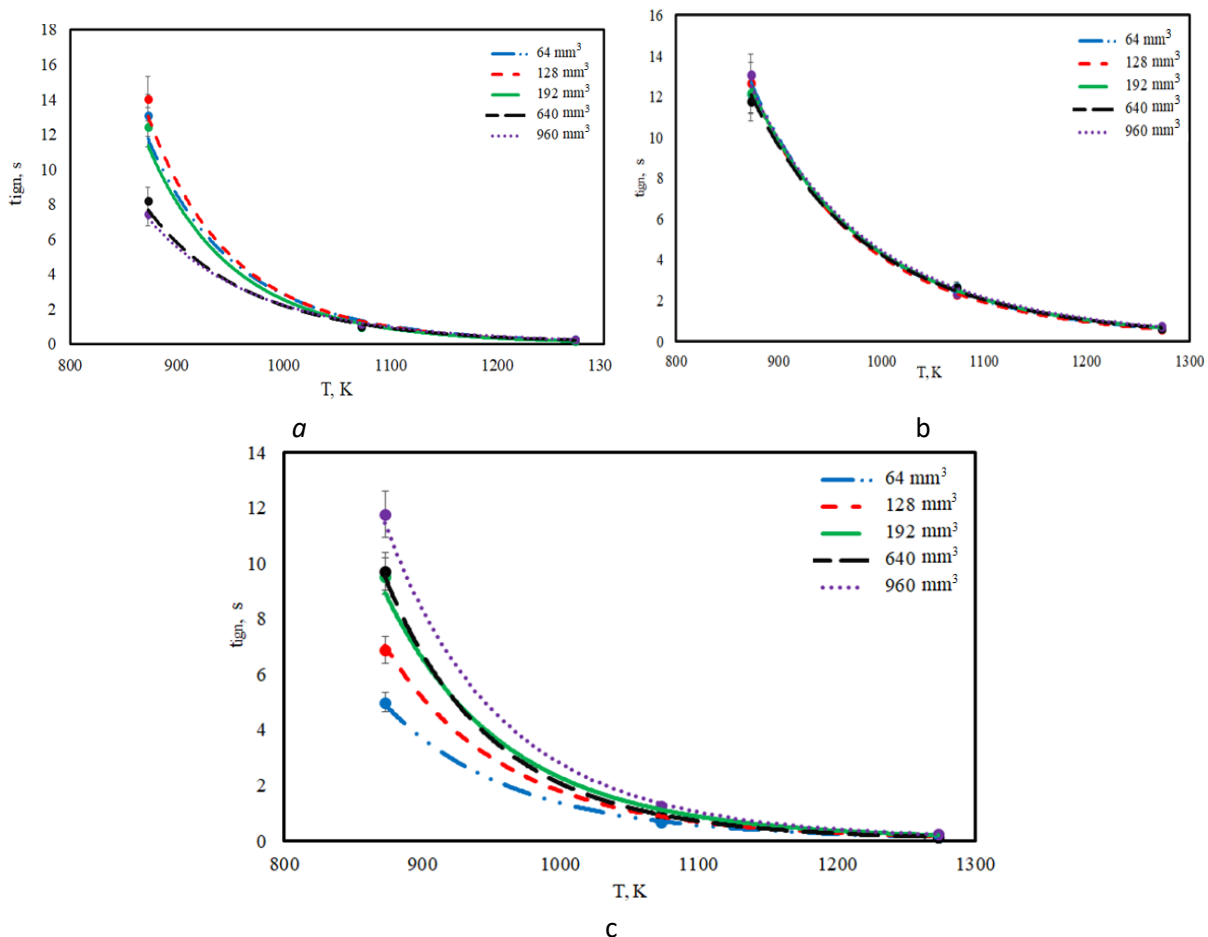


Рисунок 3.4 Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды при различных характерных размерах.

*a* – частицы в форме параллелепипеда,

*b* – частицы в форме куба;

*c* – частицы в форме тонкой пластины.

Отсутствие влияния начального объема частиц кубической формы на величину  $t_{ign}$  при минимальных характерных размерах частиц 4 мм обусловлено, скорее всего, тем, что глубина прогрева приповерхностного слоя частицы древесины, вследствие ее относительно низкой теплопроводности (в сухом состоянии), достаточна для генерации необходимого для начала горения объема летучих (горючих газов). Поэтому общие характерные размеры частиц – кубической формы (от 4 мм до 7,5 мм) не влияют на процессы, протекающие в прогретом слое частицы. Но изменение конфигурации частиц, когда по одному координатному направлению характерный размер уменьшается (куб



трансформируется в пластину), зона прогрева по толщине может стать равной половине характерного размера пластины. В этом случае прогрев частицы существенно интенсифицируется (тепло не рассеивается на относительно большую толщину), растет ее температура в приповерхностном слое и, соответственно, ускоряется процесс термического разложения древесины. Вследствие этого растет и концентрация газообразных продуктов пиролиза в пристенной области. В результате ускоряется процесс взаимодействия газообразного горючего (летучих) с окислителем (кислородом воздуха) – начинается газозное горение. С ростом температуры среды (источника нагрева) влияние конфигурации частицы на величину  $t_{ign}$  снижается. При высоких  $T_g$  концентрация горючего в зоне реакции играет меньшую роль вследствие экспоненциальной зависимости скорости горения от температуры. Относительно небольшого объема горючих газов при высоких  $T_g$  достаточно для начала горения.

На рисунке 3.5 приведены зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы трех исследованных конфигураций (прямоугольный параллелепипед, куб, пластина) от температуры внешней среды, сгруппированных по характерным размерам частиц. Сравнительный анализ зависимостей  $t_{ign}(T_g)$  показывает, что форма частиц оказывает заметно влияние на характеристики и условия зажигания. При этом быстрее всех воспламеняются частицы в форме пластины, затем начинают гореть частицы в форме параллелепипеда, кубические позже всех. Это скорее всего обусловлено в первую очередь, тем, что пластинообразные частицы прогреваются значительно быстрее остальных вследствие большой площади теплообмена и малым значением характерного (оказывающим наибольшее влияние на характеристики теплопереноса) размера – толщины.

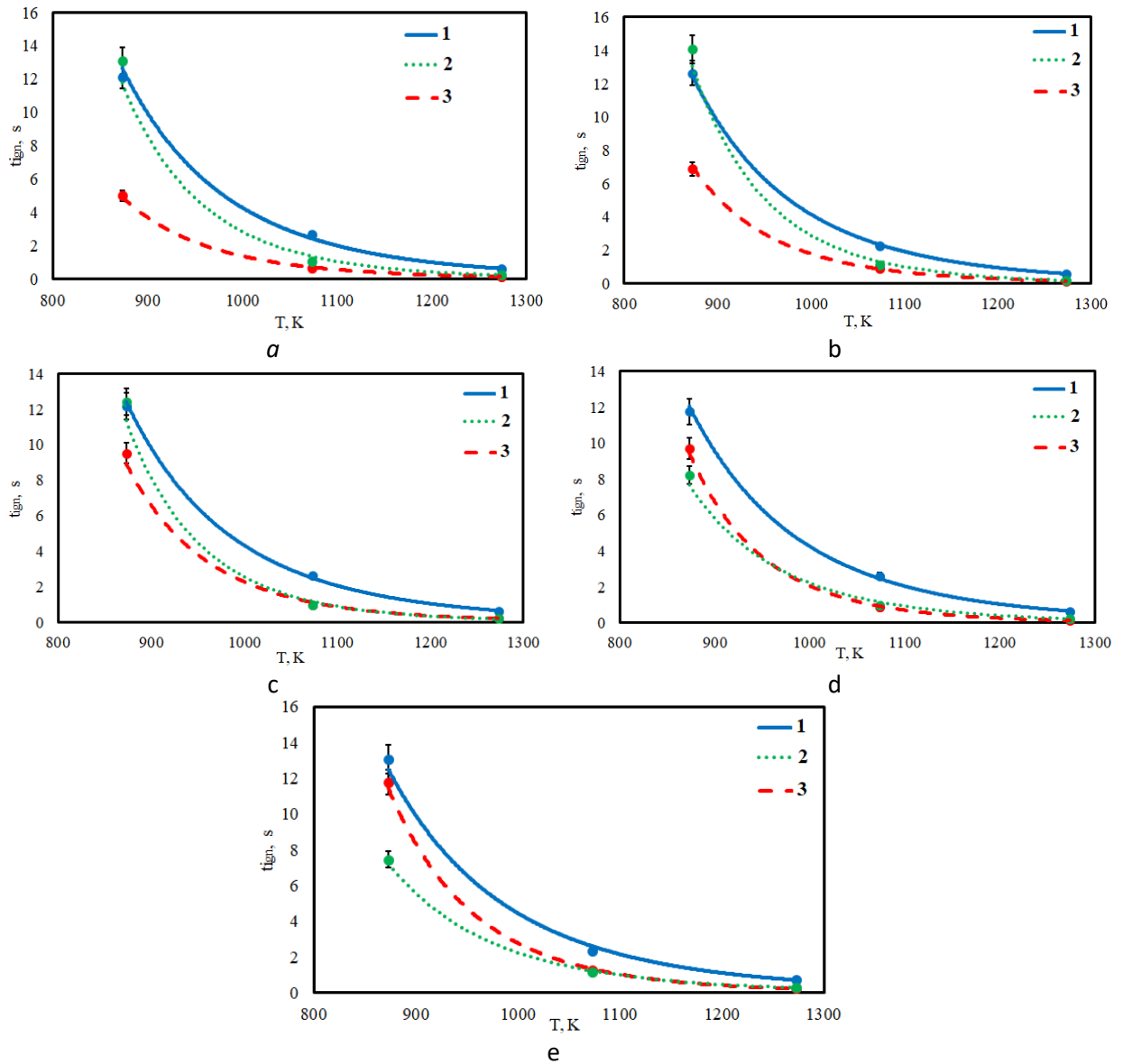


Рисунок 3.5 Зависимости времен термической подготовки частиц древесины от температуры внешней среды для разных форм частиц при условии  $V=\text{idem}$ .

1 - куб; 2 - параллелепипед; 3 – пластина.

a -  $V=64 \text{ mm}^3$ ; b -  $V=128 \text{ mm}^3$ ; c -  $V=192 \text{ mm}^3$ ; d -  $V=640 \text{ mm}^3$ ; e -  $V=960$

На рисунке 3.6 приведены зависимости времен термической подготовки частицы древесной биомассы от характерного значения ее объема ( $V$ ). Можно отметить нелинейный характер зависимостей рис.3.6 частиц для древесины кедра, выполненных в форме прямоугольного параллелепипеда при температурах внешней среды  $T_g = 873$ . Сначала при увеличении объема частицы времена задержки воспламенения растут, затем монотонно убывают.

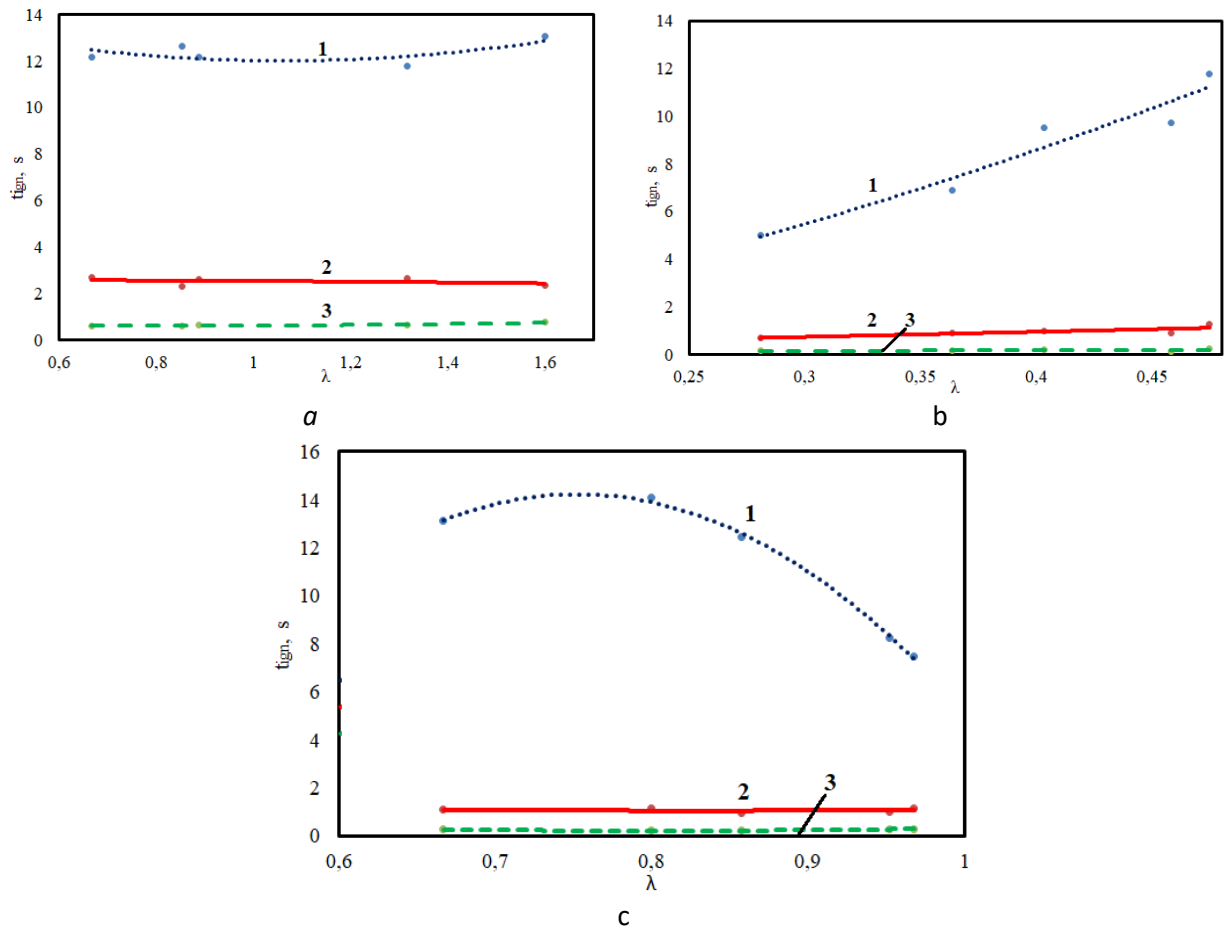


Рисунок 3.6 Зависимости времён термической подготовки частиц древесины от безразмерного характерного объема частицы ( $\lambda$ ) при температурах окружающей среды:

1 – 873 К; 2 - 1073 К; 3 – 1273 К.

a – частицы в форме куба;

b – пластинообразные частицы;

c – частицы в форме прямоугольного параллелепипеда.

Такая немонотонная зависимость обуславливается, скорее всего, особенностями протекания комплекса процессов термической подготовки при низкой температуре: радиационно-конвективный нагрев, термическое разложение основных компонентов биомассы, фильтрация продуктов пиролиза к поверхности нагрева.

Анализ кадров типичной видеозаписи показывает, что процесс газофазного зажигания частиц древесной биомассы в форме прямоугольного

параллелепипеда локализуется в торцевой зоне (рисунок 3.7). Скорее всего, в период интенсивного нагрева в частицах древесины инициируется термическое разложение, сопровождающееся интенсивным формированием летучих. В результате последние начинают фильтроваться к поверхности нагрева. Но вследствие высокого фильтрационного сопротивления поперек волокон древесины (рисунок 3.7) газообразные продукты пиролиза фильтруются не к поверхности нагрева, а в сторону торца (другими словами вдоль волокон) и вдуваются в высокотемпературную среду вблизи торцевой поверхности. В результате в зону наибольшего теплового воздействия вдувается значительный объем летучих, которые воспламеняются при критических значениях температур и концентраций.

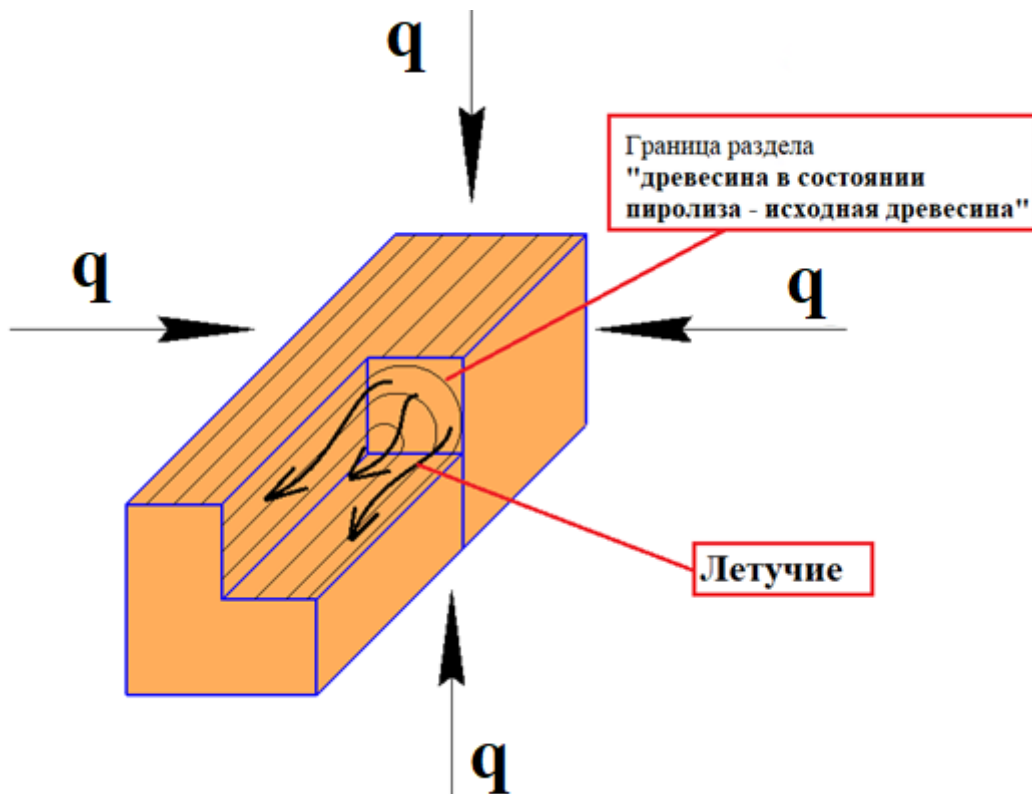


Рисунок 3.7 - Схема движения газообразных продуктов пиролиза в слое древесины. Где  $q$  – тепловой поток.

### 3.2. Особенности механизма зажигания сухих частиц древесной биомассы

Приведенные на рисунке 3.8 типичные видеокadres выполненных экспериментов иллюстрируют важную особенность механизма зажигания частиц древесины в условиях относительно неподвижной внешней среды. Хорошо видно, что горение при температуре воздуха 873 К начинается в зоне, расположенной ниже частицы на достаточно большом расстоянии, превышающем характерный размер частицы от её нижней грани. Этот неочевидный, исходя из общей теории горения конденсированных веществ, эффект может быть следствием нескольких совместно протекающих процессов.

При нагреве древесины происходит её пиролиз с образованием газообразных продуктов термического разложения (в основном окиси углерода – CO; водорода – H<sub>2</sub>; метан – CH<sub>4</sub>; другие углеводороды - C<sub>n</sub>H<sub>m</sub>), которые вдуваются в прилегающие ко всем границам частицы слои воздуха. Эти газообразные продукты (летучие) являются горючим с относительно низкой, по сравнению с окружающим воздухом, температурой, при которой зажигание не происходит. При оттоке от границы раздела «поверхность частицы-воздух» они перемешиваются с нагретым до высокой температуры воздухом, и их температура растет. Но скорость оттока летучих от поверхности частицы невелика (не превышает 1 мм/сек). Поэтому они вследствие работы сил инерции и трения могут сместиться на расстояния в несколько миллиметров от поверхности частицы за несколько секунд. Но условия движения «холодных» относительно внешней среды молей горючих газов, оттекающих от верхней и нижней граней частицы таковы, что эти газы опускаются вниз под действием сил термогравитационной конвекции и повышают концентрацию горючего под частицей. Если, например, при малых T<sub>g</sub> их температура

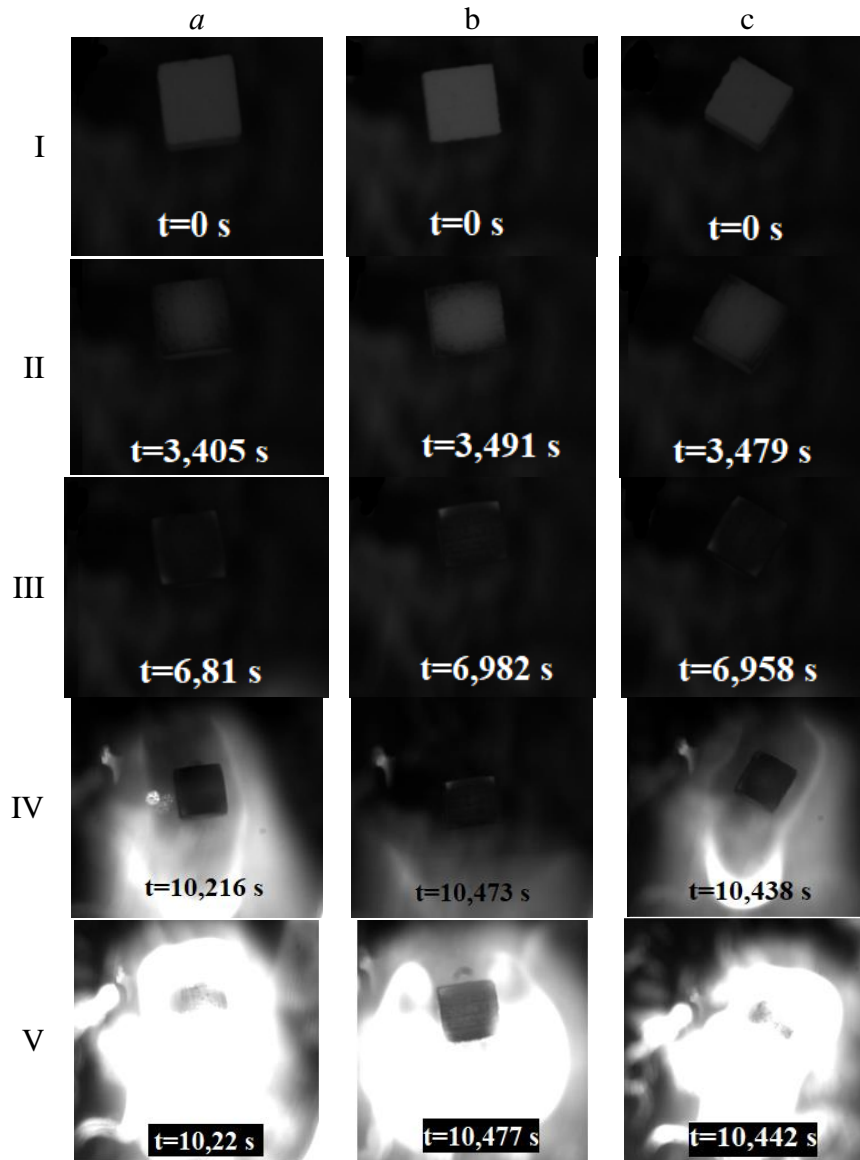


Рисунок 3.8 - Кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения частиц сухой древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя  $T_g=873$  К. Конфигурация частиц соответствует схеме, приведённой на рисунке 2.2:

Столбец *a* – рисунок 2.2*a*;

Столбец *b* – рисунок 2.2*b*;

Столбец *c* – рисунок 2.2*c*;

недостаточна для начала горения, необходимо некоторое время для прогрева летучих, движущихся вниз. Поэтому основная часть зоны

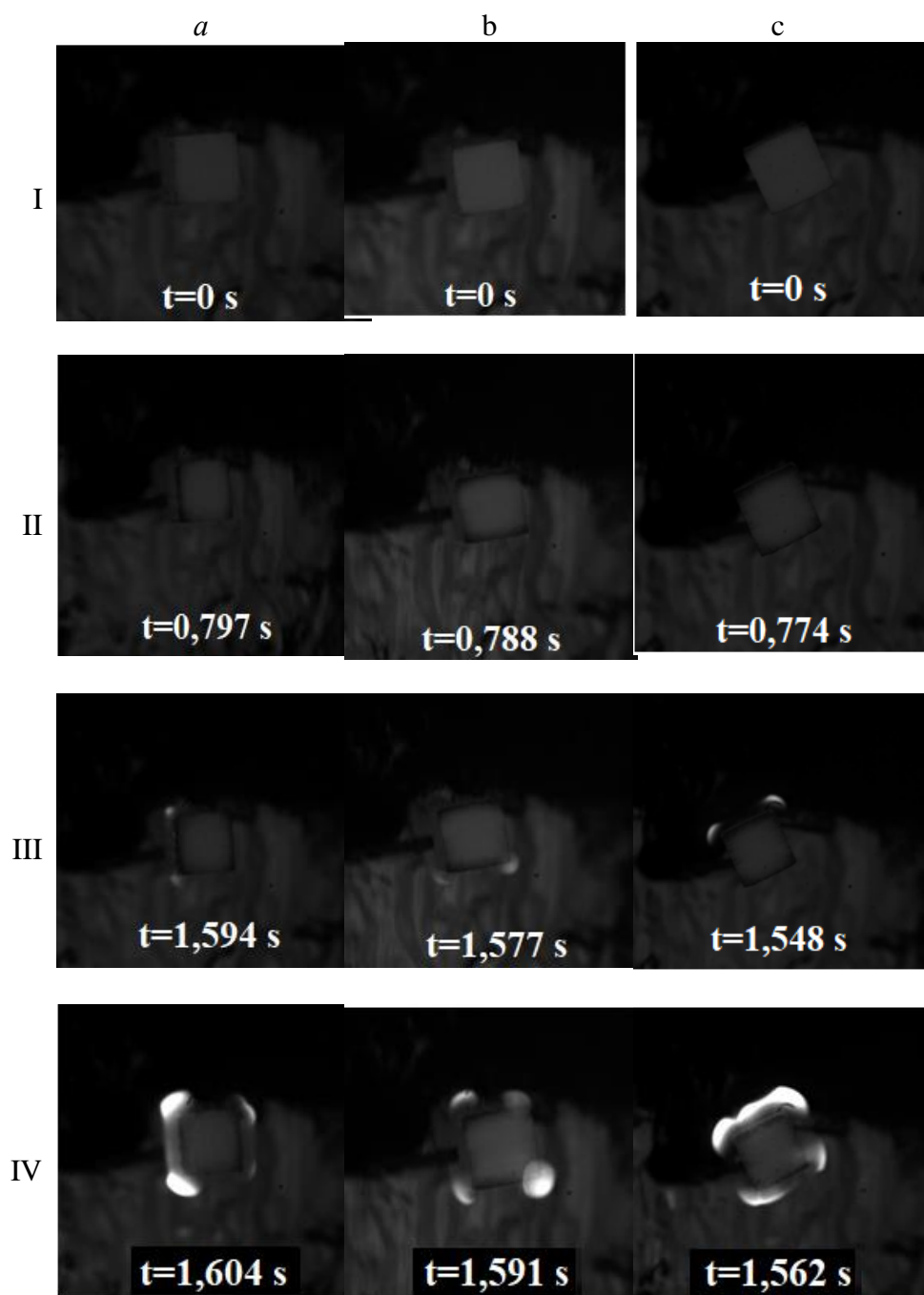


Рисунок. 3.9 - Кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения частиц сухой древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя  $T_g=1073$  К. Конфигурация частиц соответствует схеме, приведённой на рисунке 2.2:

Столбец *a* – рисунок 2.2*a*;

Столбец *b* – рисунок 2.2*b*;

Столбец *c* – рисунок 2.2*c*;

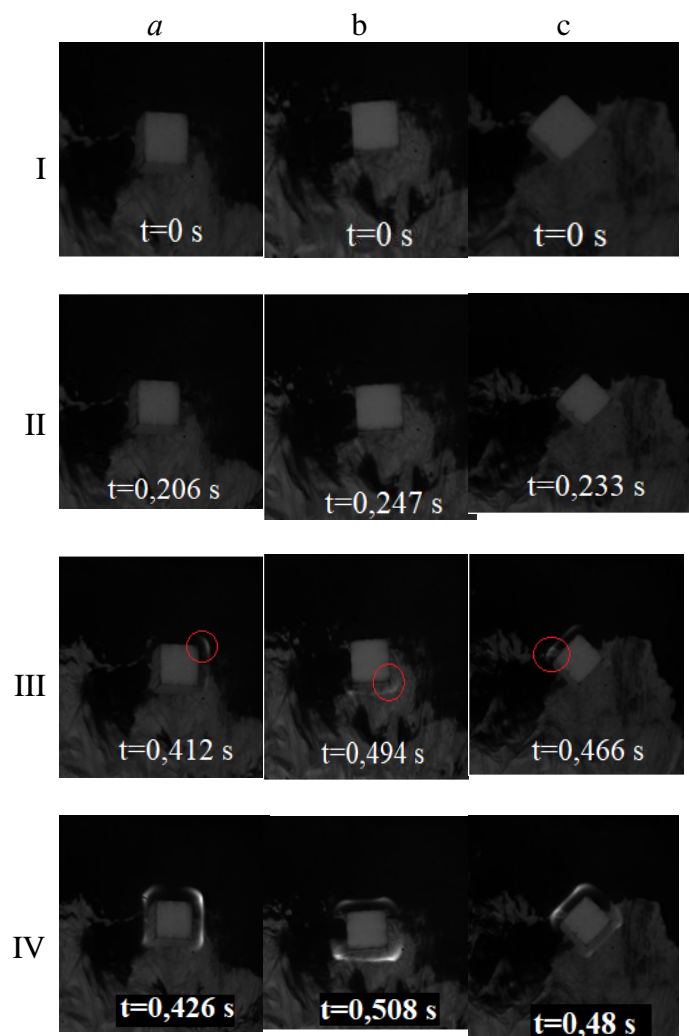


Рисунок. 3.10 - Кадры типичной видеोगраммы процесса воспламенения частиц сухой древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя  $T_g=1273$  К. Конфигурация частиц соответствует схеме, приведённой на рисунке 2.2:

Столбец *a* – рисунок 2.2*a*;

Столбец *b* – рисунок 2.2*b*;

Столбец *c* – рисунок 2.2*c*;

зажигания, которая хорошо видна на рисунок 3.8, во-первых, удалена от нижней грани частицы на расстоянии немногим больше его характерного размера, и во-вторых имеет форму дуги. Вытянутые вверх полосы пламени на рис.3.8 соответствуют зонам, заполненным летучими, поступившими в область зажигания после оттока от боковых граней в результате термогравитационной



конвекции. Нисходящие потоки летучих формируются вследствие разности температур между относительно холодными продуктами пиролиза частицы биомассы и внешней высокотемпературной окислительной средой.

Анализ приведенных на рисунке 3.8 кадров (III и IV рядов) показывает, что ориентация частицы древесной биомассы в пространстве не оказывает существенного влияния на времена задержки воспламенения, но оказывает некоторое влияние на особенности протекания комплекса процессов тепло и массопереноса непосредственно перед зажиганием. На кадре а (рис. 3.8) ряда IV при большом увеличении видно (по характерному свечению пламени), что наиболее стехиометричная смесь окислитель/горючее формируется, как правило, в газовой области под частицей.

Необходимо подчеркнуть, что этот эффект отчетливо проявляется при относительно низких температурах воздуха (873 К). С ростом температуры среды зона зажигания поднимается вверх (рисунок 3.9), так как газообразные продукты пиролиза быстрее прогреваются в результате перемешивания с горячим воздухом. Аналогичный вывод можно сделать по результатам анализа процессов зажигания частиц биомассы в условиях высоких температура ( $T_g=1273$  К) – рисунок 3.10.

Установленные в проведенных экспериментах эффекты, иллюстрирующие установленные впервые особенности газофазного механизма зажигания частицы древесной биомассы, получены при высокотемпературном нагреве частиц кедра. Этот вид древесины (очень хороший в качестве деловой) не типичен для энергетики. Поэтому аналогичные эксперименты проведены еще с тремя перспективными как топлива видами древесины (сосна, береза, осина).

На рисунке 3.11 приведены времена термической подготовки частиц древесной биомассы в зависимости от температуры внешней среды для четырех исследованных пород древесины. Можно отметить, что времена задержки зажигания трех видов древесины (береза, осина и кедр) во всем

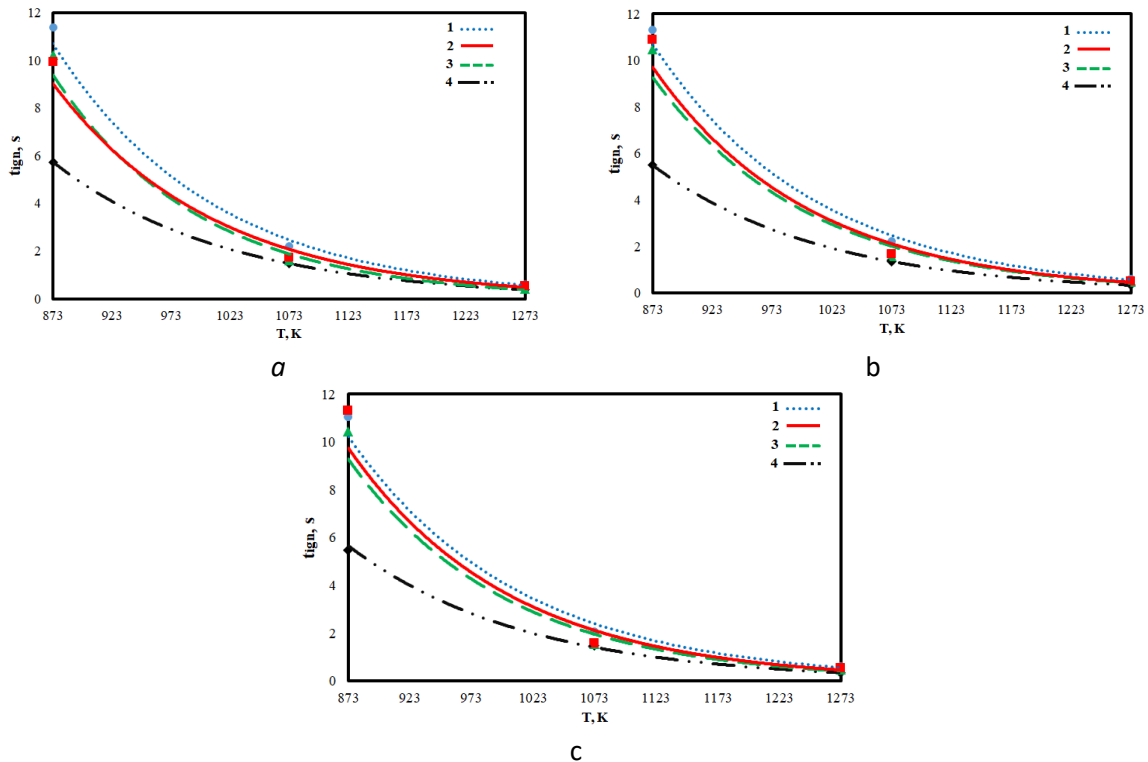


Рисунок 3.11 - Зависимости времён термической подготовки сухих частиц древесной биомассы от температуры внешней среды. Обозначения рисунков (a-c) соответствуют ориентациям частиц древесины в пространстве, приведенным на рисунке 2.2:

Рис. 3.11a – соответствует рисунку 2.2a; Рис. 3.11b – соответствует рисунку 2.2b; Рис. 3.11c – соответствует рисунку 2.2c.

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

иследовавшемся температурном диапазоне отличаются незначительно (отклонения  $\delta(t_{ign}) = |t_{ign}^m - t_{ign}^n|/t_{ign}^n$  не более 12%). 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 [81], в древесине сосны содержится значительно больше летучих, по сравнению с древесиной кедра, березы и осины. Но времена  $t_{ign}$  всех исследовавшийся видов древесины в условиях относительно ВЫСОКИХ

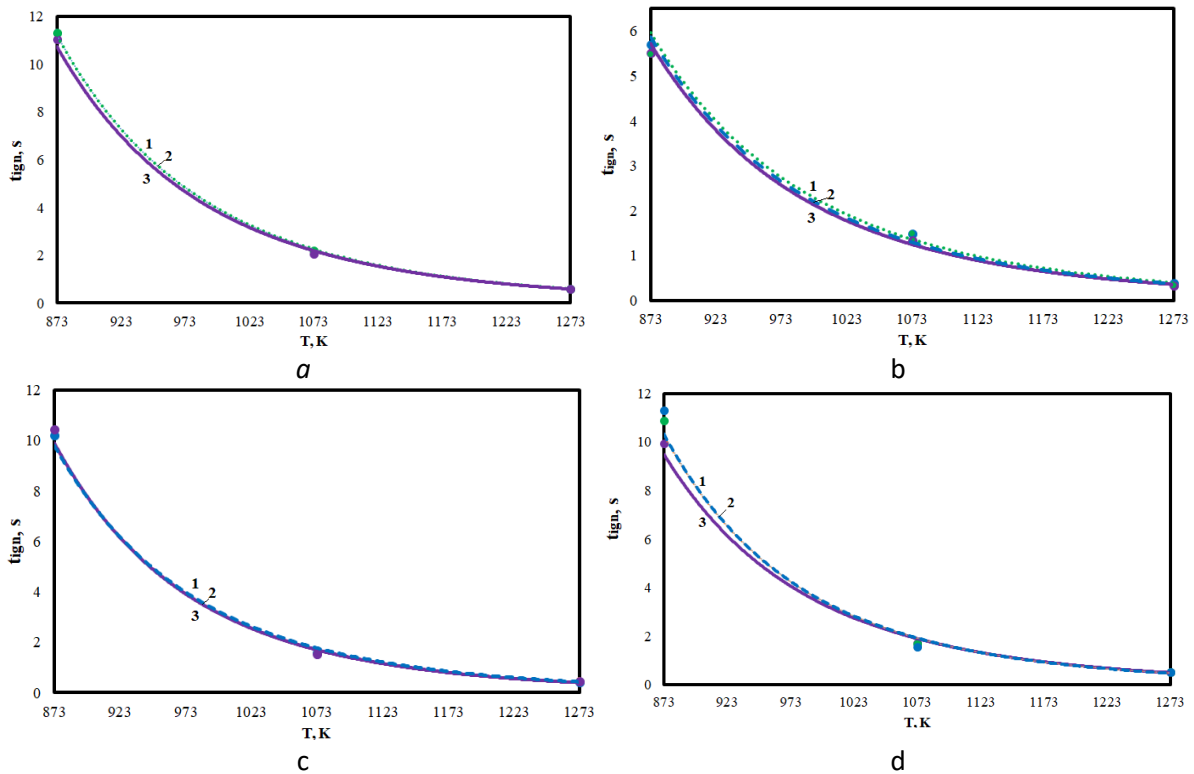


Рисунок 3.12 - Зависимости времён термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды при трех ориентациях частиц древесины в пространстве в соответствии с рисунком 2.2:

1 – Рисунок 2.2a, 2 – Рисунок 2.2b, 3 – Рисунок 2.2с.

Обозначения рисунков соответствуют видам древесины:

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

температур внешней среды ( $T_g \geq 1073 \text{ K}$ ) практически идентичны (отклонения не превышают 5%).

На рисунке 3.12 приведены аналогичные рисунку 3.11 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 (рис.3.12а – береза; рис. 3.12b – сосна; рис. 3.12с – кедр; рис. 3.12d – осина).

Анализ приведенных выше кадров видеogramм экспериментов (особенно хорошо это видно на рисунках 3.8 а-с) показывает, что естественная конвекция смеси газообразных продуктов пиролиза и окислителя в малой окрестности частицы топлива (вследствие разности температур между частицами древесины и внешней средой) оказывает значимое влияние на характер протекание процесса воспламенения. Соответственно логичен вопрос: «Каково температурное поле в малой окрестности частицы древесной биомассы (при воспламенении в относительно неподвижной окислительной среде) в период индукции?».

Эксперименты с целью установления значений температур смеси газов в малой окрестности частицы древесины проведены на аналогичном описанном в разделе «Эксперимент» экспериментальном стенде (рисунок 3.13а). Температура окислителя при проведении экспериментальных исследований составляла  $T_g=873\text{K}$ . Значения температур смеси воздуха и летучих вокруг частицы фиксировались системой из восьми хромель – алюмелевых термоэлектрических преобразователей, схема расположения которых представлена на рисунках 3.13b-d. Термопары располагались таким образом, чтобы фиксировать температуру смеси летучих и окислителя в малой окрестности частицы в восьми характерных точках. В результате измерений определялось температурное поле вокруг частицы биомассы. Такая схема расположения термопар позволяет получить наиболее полную апостериорную информацию о температурных режимах процессов термической подготовки

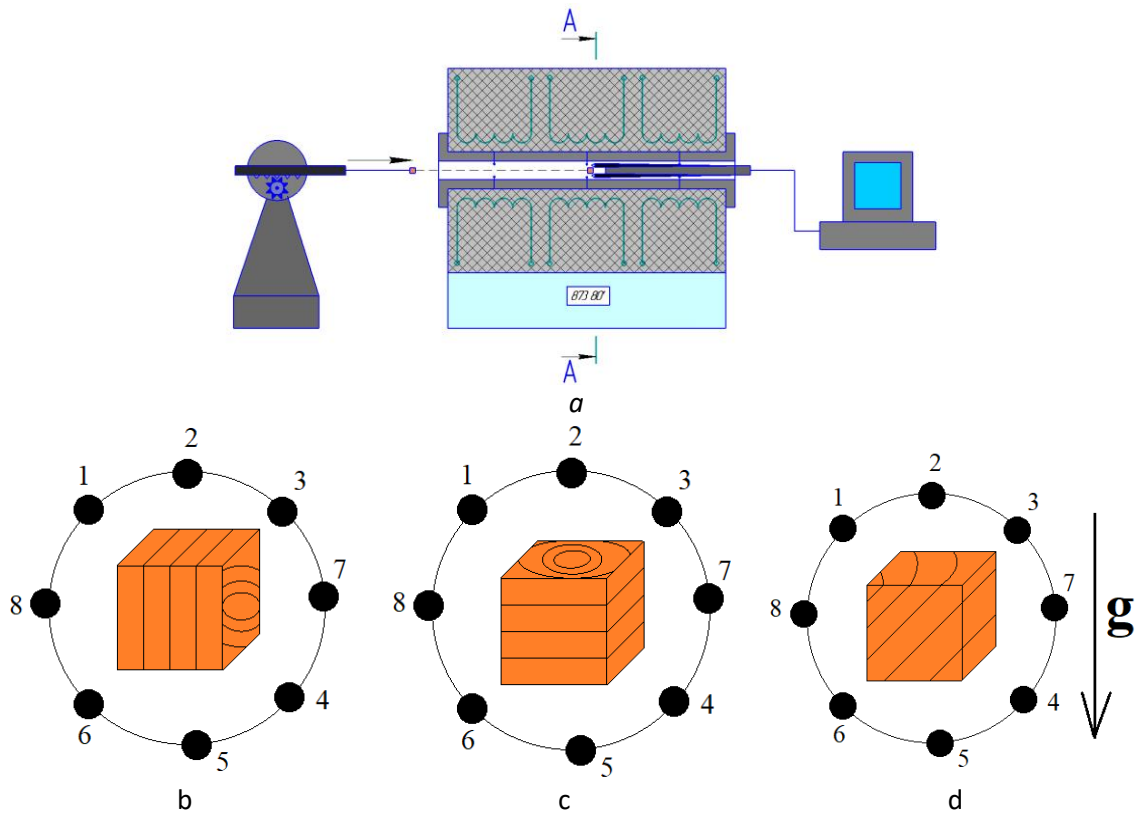


Рисунок 3.13 - Схемы экспериментальной установки (а) и расположения термопар (b) – (d) (1-8 – номера термопар).

частиц древесной биомассы при высокотемпературном нагреве последних в среде окислителя. Эти результаты значительно отличаются, например, от результатов работ [82, 83], где приведены значения температур в центр топливной частицы (на примере процесса зажигания капли органо-водоугольного топлива), при этом воспламенение таких топлив протекает в газовой фазе. Соответственно, наиболее интересны значения температур вокруг частицы топлива. Результаты выполненных в этих экспериментах измерений автоматически

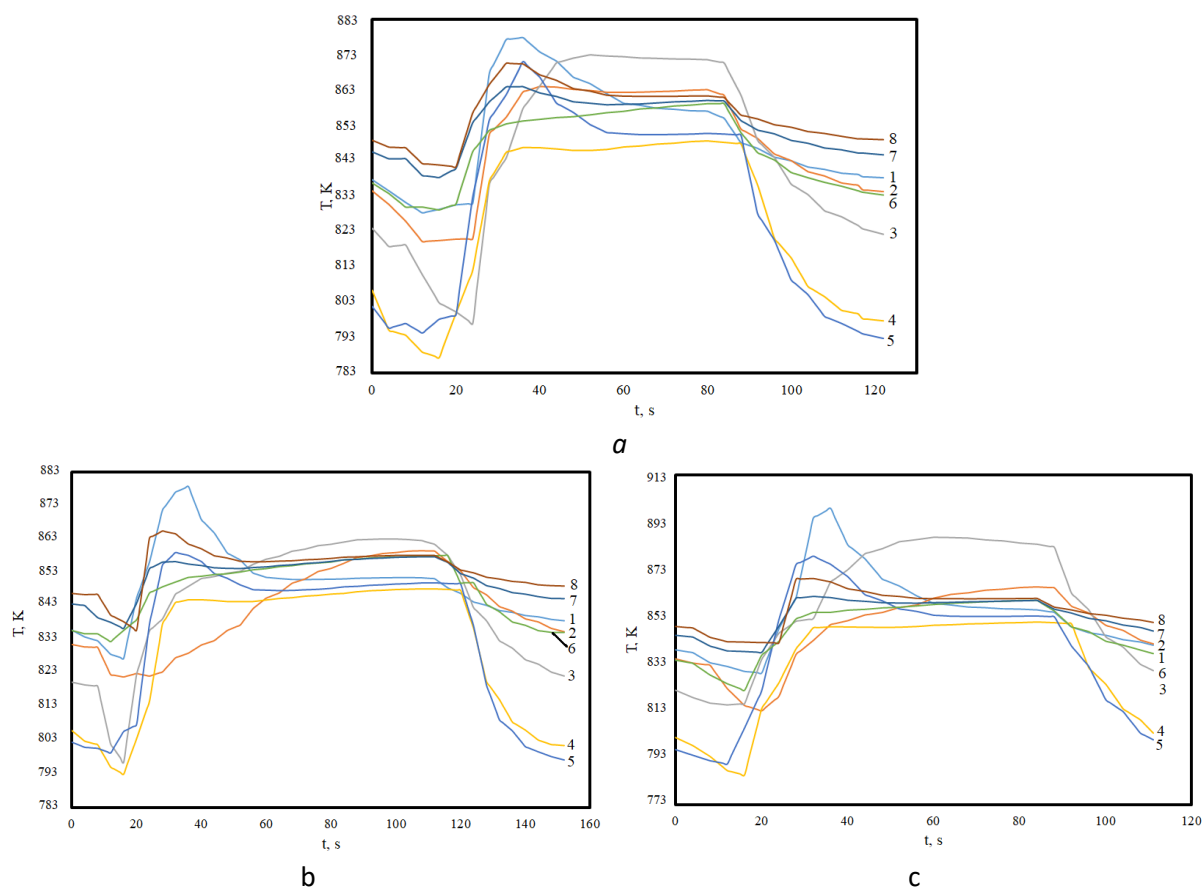


Рисунок 3.14 - Зависимости значений температуры газа в характерных точках (рисунок 3.13) окрестности частицы древесной биомассы от времени в период высокотемпературного нагрева последней. Температура внешней среды  $T_g^0 = 873K$ .

Номера кривых 1-8 соответствуют номерам термопар согласно схемам, приведенным на рисунке 3.13 b-d:

*a* – рисунок 3.13 b; *b* – рисунок 3.13c; *c* – рисунок 3.13d

фиксируются электронным регистрирующим устройством.

На рисунках 3.14 *a-c* приведены зависимости значений температуры газовой среды в характерных точках окрестности частицы сухой древесины от времени в период ее высокотемпературного нагрева в среде окислителя. Хорошо видно, что в слое газа вблизи поверхности частицы древесной биомассы формируется существенно нелинейное и немонотонно изменяющееся во времени температурное поле. В начальный период нагрева древесной биомассы (после ее ввода в полость трубчатой печи) температура в малой окрестности частицы

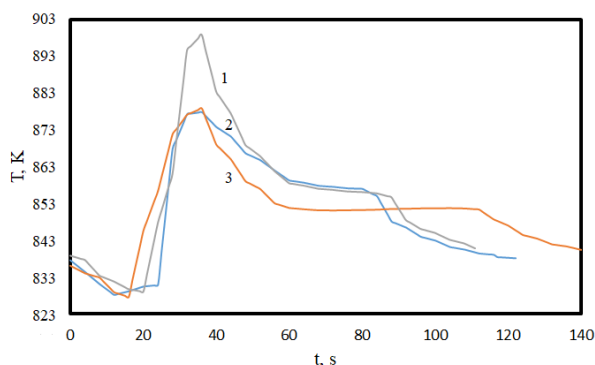
уменьшается примерно на 5%. Последнее обусловлено в первую очередь конвективным нагревом древесной частицы при передаче к последней части теплоты аккумулированной газовой средой. Нагрев биомассы приводит к термическому разложению основных компонентов древесины (целлюлозы, гемицеллюлозы, лигнина), сопровождающемуся выходом во внешнюю газовую среду летучих. Последние вдуваются в пограничный слой частицы биомассы, тем самым дополнительно охлаждают внешнюю среду и смешиваются с окислителем. После прогрева до высоких температур горючие газы вступают в активное (с лавинообразным выделением теплоты) термохимическое взаимодействие с кислородом воздуха (воспламенение). В результате в малой окрестности частицы биомассы быстро растет температура и происходит воспламенение.

Также на рисунке 3.14 хорошо видно, что вокруг частицы формируется очень сложное температурное поле. В начальный период нагрева наименьшие значения температур регистрируются в нижней (относительно частицы биомассы) полусфере. Это обусловлено в первую очередь влиянием естественной конвекции, формирующейся в результате разницы температур между относительно холодной частицей биомассы и газовой средой. Но в момент воспламенения самые высокие значения  $T_g$  зарегистрированы также под частицей древесины. Последнее можно объяснить следующим: как установлено в эксперименте (рисунок 3.8) зажигание летучих происходит в нижней полусфере частицы биомассы, другими словами в зоне наибольших концентраций газообразного горючего. Такой тренд сохраняется на весь период горения древесины. Анализ динамики изменения температур (рисунок 3.14b) показывает, что после воспламенения летучих их значения меняются в каждой точке среды незначительно.

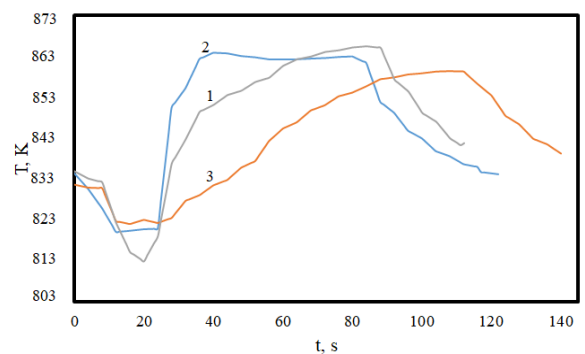
Целесообразно подчеркнуть, проводя анализ физики протекающих вблизи поверхности частиц древесины в малой по толщине зоне процессов, разные значения времен задержки зажигания частиц исследовавшихся пород древесины, установленные в экспериментах с термопарами вблизи частицы и без термопар.

Сравнение с численными значениями  $t_{ign}$  (рисунки 3.11, 3.12) и времен при которых происходит воспламенение (рисунки 3.14) дает основания для вывода о том, что восемь термопар являются достаточно значимыми факторами, оказывающими существенное влияние на динамику зажигания. Это обусловлено тем, что термопары выступают в роле своеобразных экранов, закрывающих частицу от потока излучения. Оценки показывают, что спай термопар даже при их наиболее рациональном расположении (провода отведены максимально из зоны высокотемпературного газа вблизи частицы) снижают лучистый тепловой поток к поверхности частицы. По этой причине  $t_{ign}$  частиц, окруженных термопарами, почти в два раза больше  $t_{ign}$ , к поверхности которых поступает весь тепловой поток от поверхностей нагрева и высокотемпературного газа. Аналогичный эффект экранирования частицы древесной биомассы установлен экспериментально в [84] при анализе влияния взаимного расположения и концентрации частиц древесно-угольного топлива в высокотемпературной среде. Эти результаты еще раз иллюстрируют роль лучистого потока теплоты в формировании условий для зажигания частиц твердых топлив в условиях, соответствующих топочной среде паровых и водогрейных котлов.

На рисунках 3.15a-g приведены зависимости температур газовой среды от времени, сгруппированные для каждой отдельной термопары при трех разных ориентациях частиц древесной биомассы в пространстве.

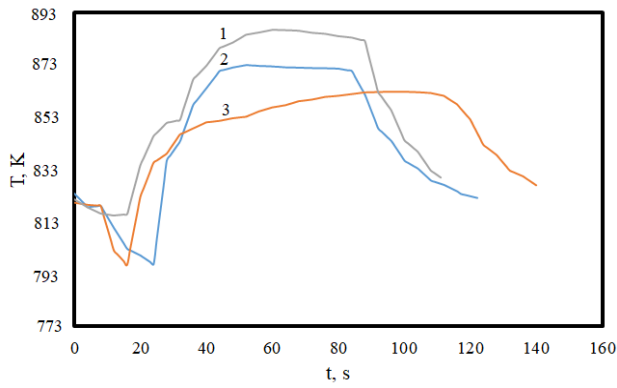


a

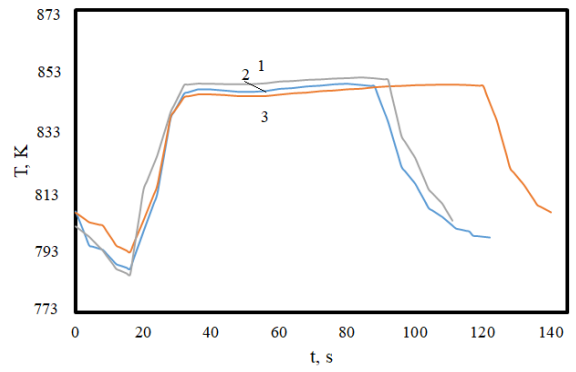


b

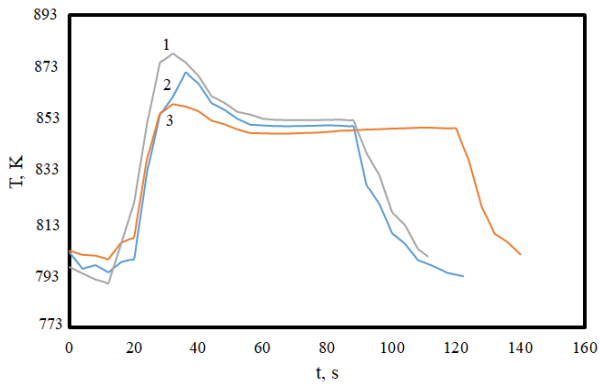




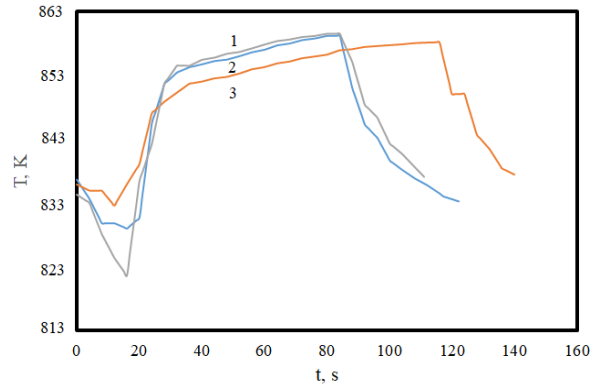
c



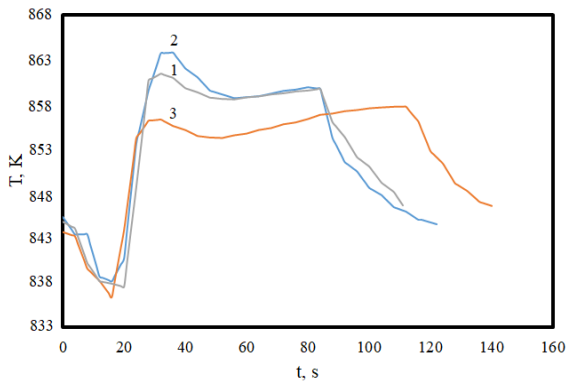
d



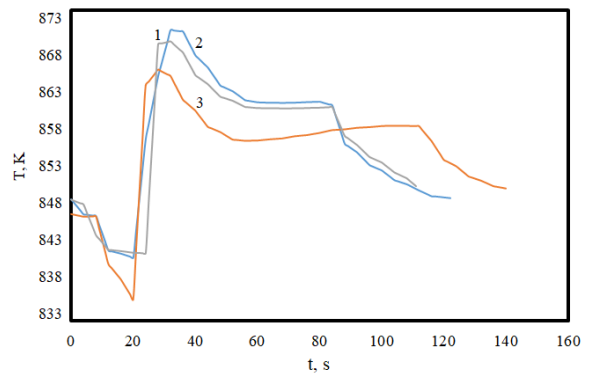
e



f



g



h

Рисунок 3.15 - Зависимости значений температуры газа в малой окрестности частицы сухой древесной биомассы от времени в период высокотемпературного нагрева последней. Температура внешней среды  $T_g^0 = 873K$ . Номера кривых соответствуют ориентациям частиц древесины в пространстве, приведенным на рисунке 8:

1 – рисунок 3.13b; 2 – рисунок 3.138с; 3– рисунок 3.13d;

Буквенные обозначения соответствуют номерам термопар, приведенным на рисунках 3.13b-d: a – термопара №1; b – термопара №2; c – термопара №3; d -

термопара №4; e - термопара №5; f - термопара №6; g - термопара №7; h - термопара №8.

Анализ зависимостей, приведенных на рисунках 3.15 a-g показывают, что ориентация частиц древесной биомассы в пространстве не оказывает значимого влияния на характеристики процессов тепло- и массопереноса, протекающих в индукционный период времени в непосредственной близости от поверхности частицы. Есть некоторые отличия температуры в случае зажигания кубической частицы древесины при ориентации последней в соответствии с рисунком 3.13d (при повороте на  $45^\circ$  относительно вектора силы тяжести). Это скорее всего обусловлено тем, что в период зажигания и горения такой частицы внешний поток окислителя ее обтекает с меньшим сопротивлением (как установлено по результатам экспериментов [85]). В результате температура (по показаниям всех термопар) в малой окрестности этих частиц меньше чем для двух других положений, вследствие интенсивного массообмена и оттока продуктов горения летучих от поверхности биомассы.

### **3.3. Особенности механизма зажигания влажной частицы древесной биомассы**

На рисунке 3.16 приведены типичные видеокadres процесса воспламенения частиц влажной (характерный размер 4 мм с влажностью  $\varphi=45\%$ ) древесной биомассы (кедр). Светлые зоны на кадрах вне частицы соответствуют первым очагом газофазного горения продуктов пиролиза древесины.

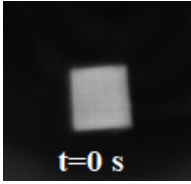



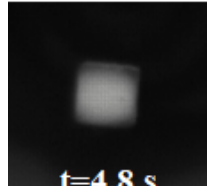
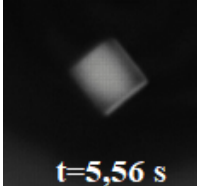
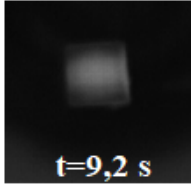

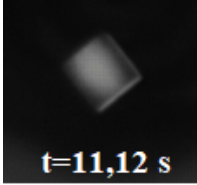
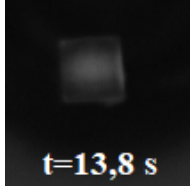
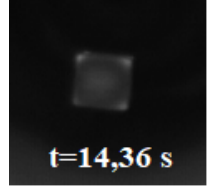
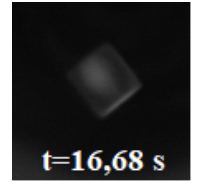
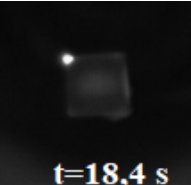


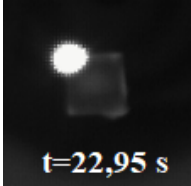




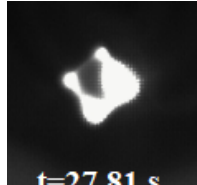
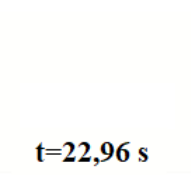
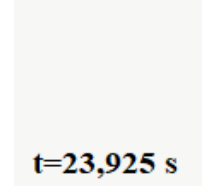


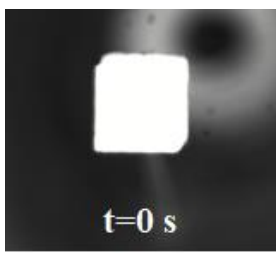
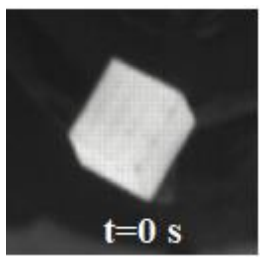
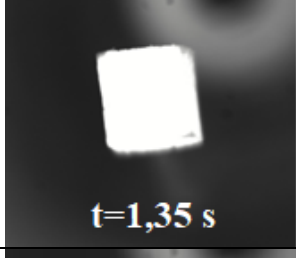

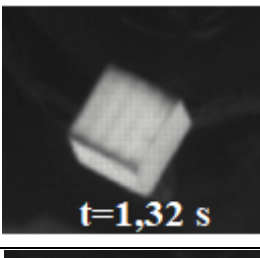


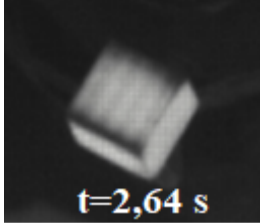
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
I	 t=0 s	 t=0 s	 t=0 s
II	 t=4,6 s	 t=4,8 s	 t=5,56 s
III	 t=9,2 s	 t=9,56 s	 t=11,12 s
IV	 t=13,8 s	 t=14,36 s	 t=16,68 s
V	 t=18,4 s	 t=19,16 s	 t=22,24 s
VI	 t=22,95 s	 t=23,9 s	 t=27,8 s
VII	 t=22,955 s	 t=23,91 s	 t=27,81 s
VIII	 t=22,96 s	 t=23,925 s	 t=27,825 s

Рисунок 3.16 - Кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя  $T_g=873$  К. Конфигурация частиц соответствует

схеме, приведённой на рисунке 2.2: столбец *a* – рисунок 2.2*a*; столбец *b* – рисунок 2.2*b*; столбец *c* – рисунок 2.2*c*;

Хорошо видно, что ориентация частиц в пространстве не оказывает существенного влияния на времена задержки зажигания. Также видно, что горение газообразных продуктов пиролиза древесины начинается в малой окрестности угловых точек образца, имеющего форму куба. На рисунке 3.16 идентифицированы моменты времени, соответствующие первым признакам горения. Установлено, что уже через 0,005-0,015 с пламя охватывает всю частицу – горение происходит вблизи всех шести граней образца.

На рисунке 3.17 приведены типичные видеокадры процесса зажигания влажных частиц кедр при температуре внешней среды 1073К. Сравнение рисунков 3.16 и 3.17 показывает, что увеличение температуры воздуха, в которой вводится частица, на 200К приводит к кратному (в 4-5 раз) снижению времен задержки зажигания.

	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
<b>I</b>	 t=0 s	 t=0 s	 t=0 s
<b>II</b>	 t=1,35 s	 t=1,31 s	 t=1,32 s
<b>III</b>	 t=2,7 s	 t=2,62 s	 t=2,64 s

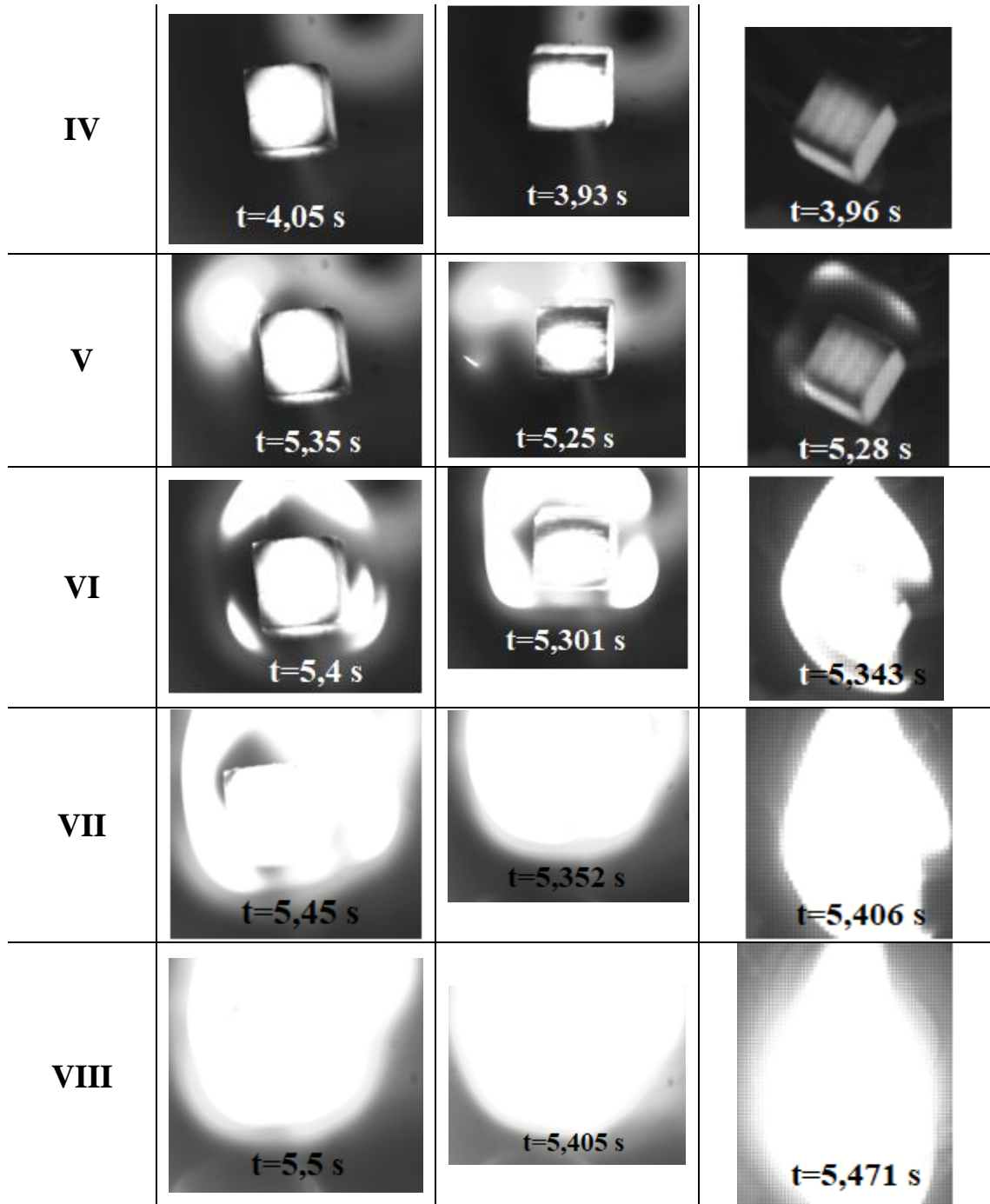


Рисунок 3.17 - Кадры типичной видеограммы процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя  $T_g=1073$  К. Конфигурация частиц соответствует схеме, приведённой на рисунке 2.2: столбец а – рисунок 2.2а; столбец б – рисунок 2.2б; столбец с – рисунок 2.2с;

Также можно отметить, что ориентация частиц в пространстве не оказывает значимого влияния на времена задержки зажигания. Кадры рисунка 3.17 при

этом очень наглядно иллюстрируют газофазный механизм зажигания частиц влажной древесины кедра.

На рисунке 3.18 приведены аналогичные рисункам 3.16, 3.17 кадры при температуре внешней среды 1273К. Можно отметить, что при такой достаточно высокой температуре процесс непосредственного зажигания происходит на существенно большем по сравнению с температурами среды 873 и 1073К расстоянии от поверхностей граней частицы. Рост температуры приводит к смещению зоны интенсивной химической реакции газообразных продуктов пиролиза древесины и воздуха вверх (при меньшей температуре 873К зажигание происходит в окрестности не только верхних, но и нижних угловых точек частиц древесины).

Установленные закономерности можно объяснить тем, что с ростом температуры увеличивается скорость испарения влаги и термического разложения древесины в слое, из которого влага уже удалена. Интенсивное испарение воды приводит к тому, что смесь паров воды и горючих газообразных продуктов пиролиза имеет относительно низкую температуру, которой недостаточно для начала горения этой смеси у поверхности частицы. Только после вдува на достаточно большое расстояние от поверхности частицы горючие газы прогреваются в результате теплообмена горячим воздухом до температур, при которых возможно зажигание. После начала газофазного горения выделяющаяся в результате теплота интенсифицирует процесс распространения горения вокруг всей частицы

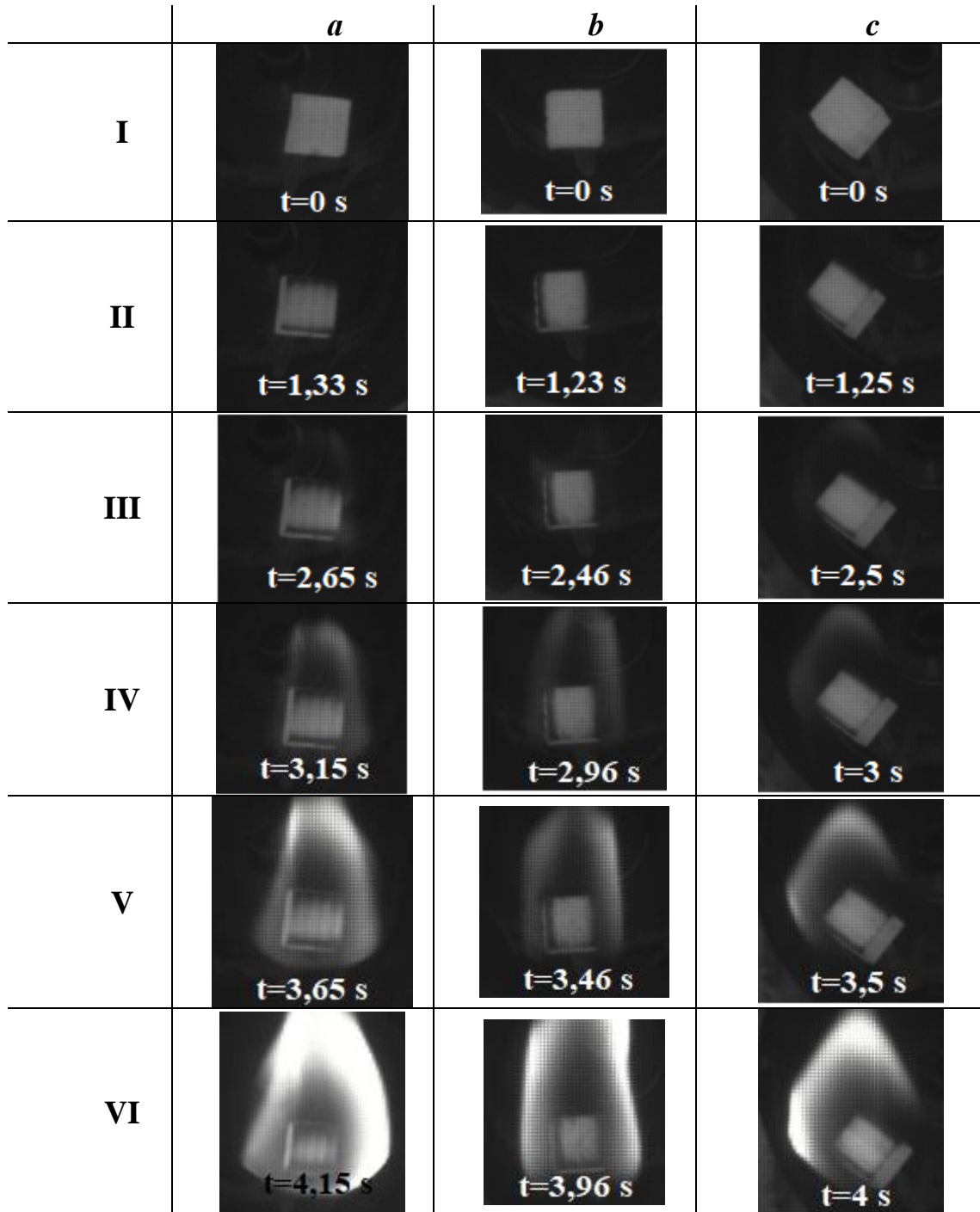


Рисунок 3.18 - Кадры типичной видеозаписи процесса воспламенения частиц влажной древесной биомассы (кедр) при температуре окислителя  $T_g=1273$  К. Конфигурация частиц соответствует схеме, приведённой на рисунке 2.2: столбец *a* – рисунок 2.2а; столбец *b* – рисунок 2.2б; столбец *c* – рисунок 2.2с;

На рисунке 3.19 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 (873К) времена задержки зажигания сухих и влажных частиц всех четырех видов древесины отличаются в 2-2,5 раза.

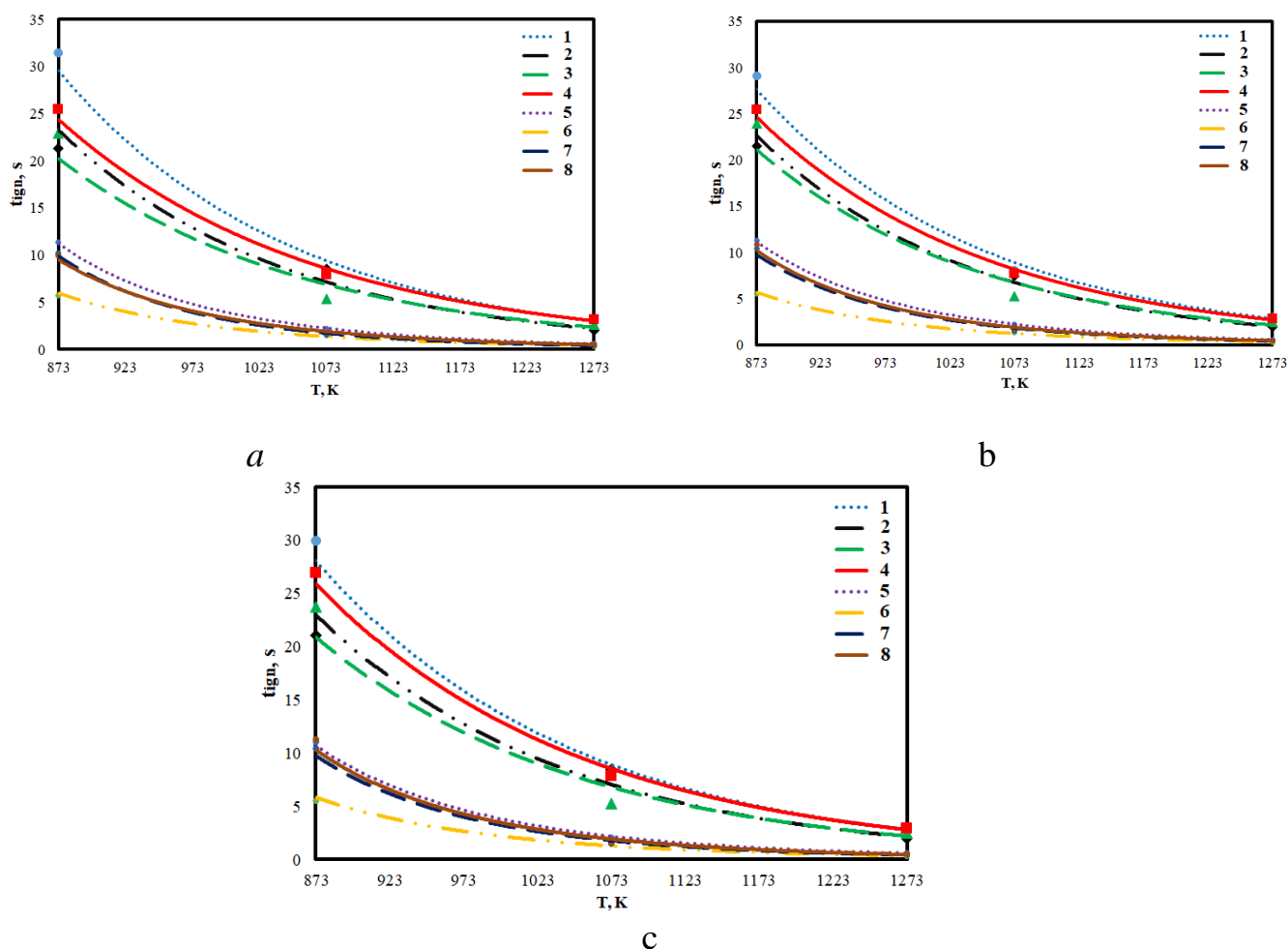


Рисунок 3.19 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды. При ориентации древесины в пространстве в соответствии с:

*a* – рисунок 2.2а; *b* – рисунок 2.2б; *c* – рисунок 2.2с

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.

#### **3.4. Исследование процессов зажигания частиц древесной биомассы в условиях сложного нагрева**

На рисунке 3.20 приведены типичные кадры видеogramм процессов воспламенения частиц древесной биомассы в разных условиях нагрева: I и II – зажигание в условиях конвективного нагрева; III и IV – зажигание при радиационно-конвективно-микроволновом нагреве; V и VI – зажигание в преимущественно радиационном нагреве.

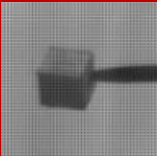
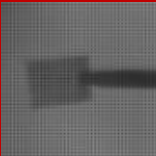
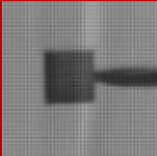
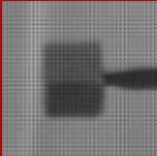


Анализ кадров (рис. 3.20) показывает, что медленнее всего зажигаются частицы в условиях преимущественно радиационного нагрева. Это обусловлено тем, что в условиях относительно низких температур внешней среды ( $T_g=870$  К) большое влияние оказывают пары воды, вдуваемые в область вблизи поверхности частицы.

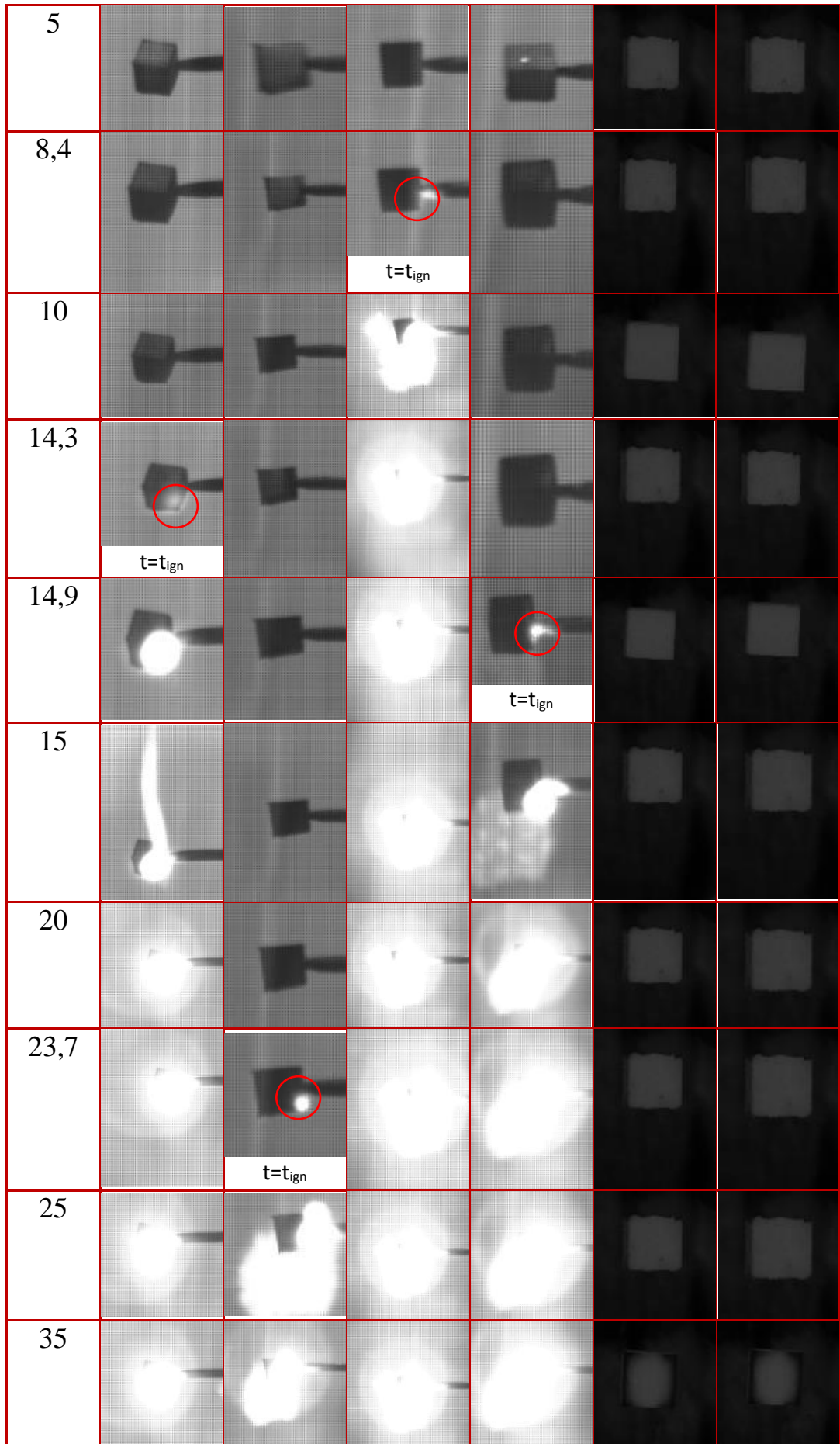
Быстрее всего зажигаются частицы биомассы в условиях комбинированного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. Известно, [74] скорость испарения жидкости определяется концентрацией её паров вблизи поверхности испарения и температурой этой поверхности. В условиях доминирования конвективного нагрева поток воздуха внешней по отношению к частице среды, обтекая её, уносит с собой пары воды. В результате скорость испарения воды после удаления большей части паров от поверхности частицы имеет высокие значения. Если же нагрев только радиационный (поток воздуха не обтекает частицу), то пары воды не уносятся от поверхности испарения, их концентрация вблизи этой поверхности значительна, и, соответственно скорость испарения мала. В результате частица нагревается

медленнее (теплоемкость паров воды велика), влага выходит из пористой структуры древесины медленнее. Вследствие этого снижается скорость пиролиза древесины, уменьшается концентрация горючих газов (летучих) вокруг частицы и увеличивается время задержки газофазного зажигания частицы древесины.

Сравнительный анализ кадров, приведенных на рисунке 3.20 в столбцах I – IV показывает, что микроволновое воздействие приводит к значительному ускорению (примерно на 30 % при зажигании сухих частиц древесины и на 40 % в случае воспламенения влагонасыщенной биомассы) процесса зажигания частицы древесной биомассы. Это обусловлено в первую очередь тем, что в результате поглощения микроволновой энергии происходит нагрев древесной биомассы по всему объему частицы (в том числе и в глубинных слоях).

Необходимо отметить, что в случае зажигания влажной древесной биомассы эффект воздействия микроволнового излучения проявляется значительно, по сравнению с зажиганием сухих частиц древесины. Скорее всего, в период радиационно-конвективно-микроволнового нагрева внутрипоровая вода и водяные пары, фильтрующиеся сквозь пористый каркас, интенсивно поглощают микроволновое излучение (тангенс угла диэлектрических потерь воды [75]). Соответственно, нагрев влажной древесной биомассы происходит более интенсивно по сравнению с сухой. А это в конечном итоге приводит к тому, что уменьшается перепад температур по толщине частицы, снижается интенсивность теплоотвода в глубинные слои древесины, растёт температура приповерхностных слоёв частицы и скорость пиролиза. В результате увеличивается концентрация горючих газов у поверхности частицы, растёт скорость химического реагирования последних с кислородом воздуха и снижается время термической подготовки.

t/c	I	II	III	IV	V	VI
0						



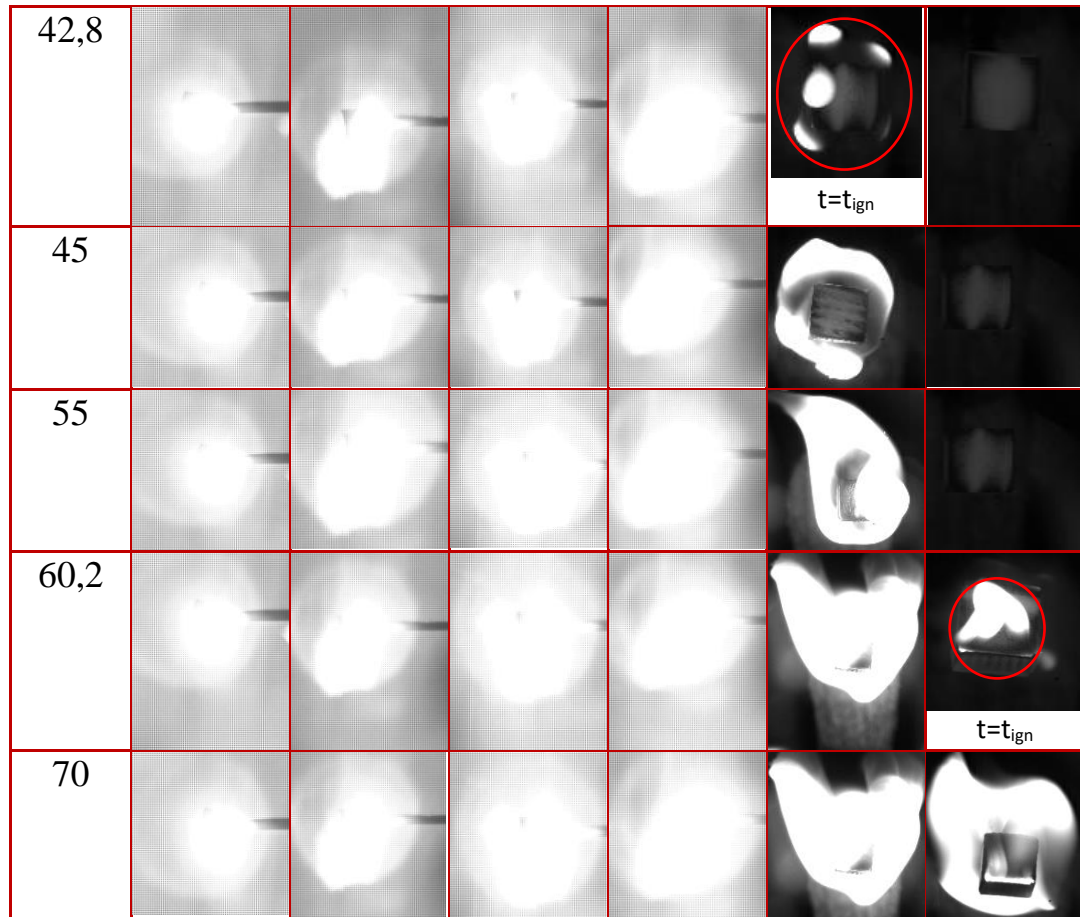


Рисунок 3.20 - Типичные кадры процесса воспламенения частиц древесины в разных условиях нагрева при температуре внешней среды  $T_g=773$  К:

I и II – зажигание в условиях радиационно-конвективного нагрева;

III и IV – зажигание при радиационно-конвективно-микроволновом нагреве;

V и VI – зажигание при преимущественно радиационном нагреве;

I, III, V – зажигание сухих частиц древесины;

II, IV, VI – зажигание влагонасыщенных частиц древесины,

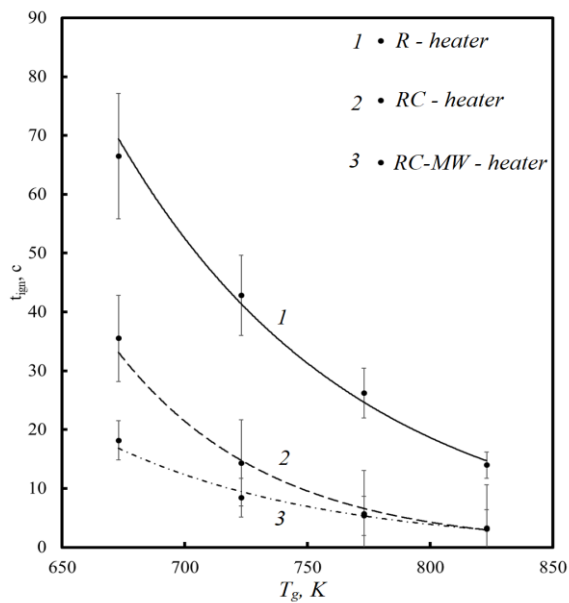
t – время, с.

Также сравнительный анализ кадров столбцов (I–IV) и (V–VI) показывает существенные отличия механизмов зажигания частиц древесины при воздействии высокотемпературного потока окислителя и при преимущественно радиационном нагреве. В первом случае зажигание происходит, как правило, на поверхности частицы с «подветренной» стороны последней. Это обусловлено тем, что фронтальная (по отношению к потоку) полусфера частицы – наиболее

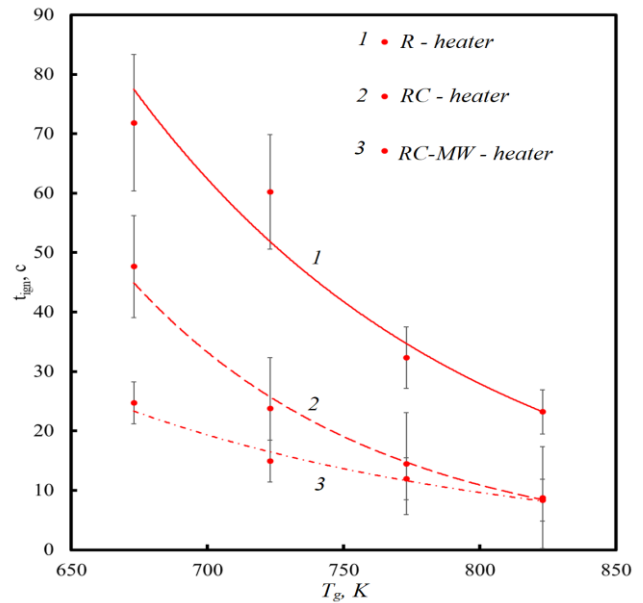
энергонапряженное место. В результате летучие, формирующиеся в результате пиролиза, при вдуве в зону вблизи поверхности частицы биомассы практически мгновенно воспламеняются.

При зажигании древесины в условиях преимущественно радиационного нагрева, относительно холодные газообразные продукты пиролиза совместно с водяными парами (при зажигании влажных частиц древесины) вдуваются в зону вблизи поверхности частицы. При этом, как показано в [76], происходит интенсивное охлаждение пристенной зоны топлива. Последнее приводит к некоторому замедлению процесса воспламенения. Газофазное зажигание парогазовой смеси происходит при выполнении условий прогрева последней смеси до критических значений температур и при необходимом (для стабильного горения) соотношении концентрации в системе горючее/окислитель. При этом вокруг частицы образуется сфера пламени, размеры которой много больше характерного размера частицы древесной биомассы.

На рисунке 3.21 (а, б) приведены зависимости времен термической подготовки частицы древесной биомассы от температуры внешней среды. Можно отметить существенные отличия времен термической подготовки при разных доминирующих механизмах нагрева в условиях низких температур внешней среды (при  $T_g < 750$  К). Как уже говорилось выше, медленнее всего зажигаются частицы в условиях преимущественно радиационного нагрева.



a



b

Рисунок 3.21 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды при вариации условий нагрева:

1 – преимущественно радиационный нагрев; 2 – радиационно-конвективный нагрев; 3 – радиационно-конвективно-микроволновой нагрев; а – сухие частицы; б – влагонасыщенные частицы древесной биомассы

Анализ зависимостей, приведенных на рисунке 3.21, показывает, что быстрее всех зажигаются частицы древесной биомассы в условиях сложного радиационно-конвективно-микроволнового нагрева. При этом сравнительный анализ кривых (2)-(3) показывает, что наибольшее влияние на характеристики и условия зажигания микроволновый нагрев оказывает в условиях относительно низких температур внешней среды. По этой причине большой вклад в нагрев частицы вносит микроволновое воздействие, которое не зависит от температуры.

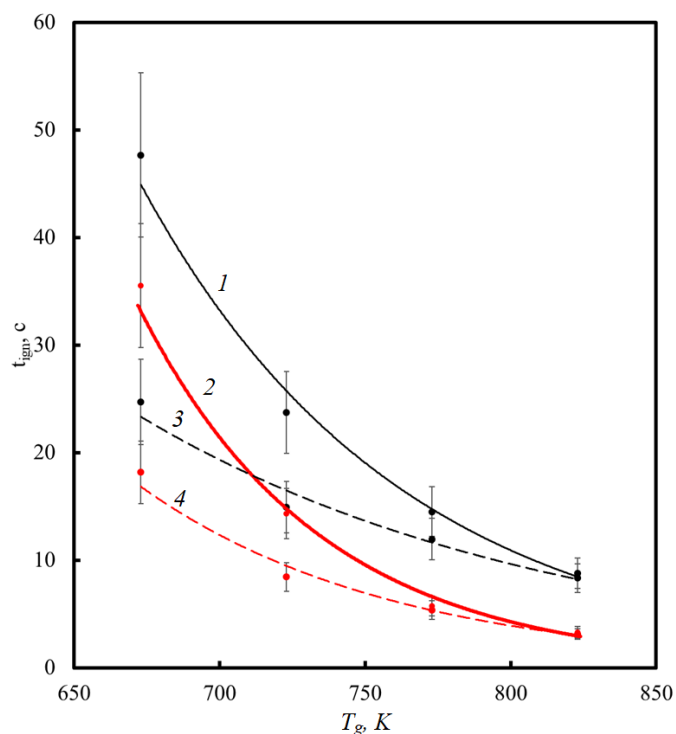


Рисунок 3.22 - Зависимости времени термической подготовки древесных частиц в потоке высокотемпературной среды от её температуры при различных условиях нагрева: 1, 3 – радиационно-конвективный нагрев; 2, 4 – радиационно-конвективно-микроволновый нагрев; 1, 3 – влагонасыщенные частицы биомассы; 2, 4 – сухие частицы биомассы

На рисунке 3.22 приведены зависимости времен термической подготовки частиц влажной и сухой древесины в условиях радиационно-конвективного и радиационно-конвективно-микроволнового нагрева от температуры внешней среды. Можно отметить, что и в этом случае микроволновое воздействие существенно ускоряет процесс воспламенения. Анализ зависимостей  $t_{ign}(T_g)$ , приведенных на рисунке 3.22, показывает, что наибольшее влияние на протекание всего комплекса процессов термической подготовки микроволновое воздействие оказывает при относительно низких температурах внешней среды. С увеличением  $T_g$  отличие значений  $t_{ign}$  (при разных условиях нагрева) уменьшается. Это связано с тем, что увеличение температуры внешней среды приводит к значительному росту интенсивности радиационного нагрева. В результате роль микроволнового воздействия становится незначительной.

Обратная ситуация при относительно низких значениях  $T_g$ . В этом случае микроволновое излучение оказывает существенное влияние на динамику протекания комплекса процессов термической подготовки.

В связи с вышеизложенным стоит отметить, что низкотемпературное сжигание топлива является перспективным направлением развития котельной техники [78]. Это обусловлено тем, что при работе низкотемпературных топочных устройств [79] существенно снижаются выбросы оксидов азота ( $NO_x$ ) и серы ( $SO_x$ ). Также надо сказать, что снижение температуры внутритопочной среды очевидно приведет к росту надежности работы котельного агрегата за счет уменьшения интенсивности формирования золотого слоя на поверхностях теплообмена (вследствие снижения температуры горения ниже температуры начала шлакования [80]), а также снижения рисков возникновения подшламовой коррозии [81].

Одним из важнейших параметров, оказывающим существенное влияние на обоснование выбора технологической схемы топливосжигания, режимов сжигания топлива, температуры воздуха в первичном и вторичном дутье, температуры предварительного прогрева топочного пространства является предельная температура зажигания (по терминологии В.И. Вилюнова [82]). Последняя определяет такое значение температуры, до которой необходимо нагреть поверхность топливной частицы, чтобы стабильно происходило термохимическое взаимодействие горючего и окислителя (т.е. такая реакция, когда соблюдается условие - скорость притока теплоты за счет сгорания горючего превышает скорость оттока теплоты вследствие теплообмена с внешней средой). По этой причине необходимо установление по результатам экспериментов влияния микроволнового нагрева топливных частиц на значения предельной температуры их воспламенения.

На рисунке 3.23 приведены предельные значения температуры воспламенения ( $T_{ign}$ ). Можно отметить, что значения  $T_{ign}$  при радиационном и радиационно-конвективном нагреве отличаются незначительно (отличия не более чем на 3 %). Но в условиях радиационно-конвективно-микроволнового



нагрева предельная температура внешней среды, при которой происходит стабильное воспламенения, значительно уменьшается (более чем на 60 %). Это, скорее всего, обусловлено тем, что при микроволновом воздействии происходит существенный нагрев не только приповерхностных, но и глубинных слоёв топлива. Последнее приводит к значительному росту температуры по всему объёму частицы древесной биомассы. В результате значительно интенсифицируется весь комплекс процессов термической подготовки и, соответственно, термического разложения основных компонентов биомассы. Последнее приводит к росту скорости притока газообразных продуктов пиролиза в пограничный слой частицы. При этом стоит отметить, что летучие вдуваются в зону термохимического взаимодействия с окислителем уже значительно нагретые за счёт поглощения электромагнитной энергии.

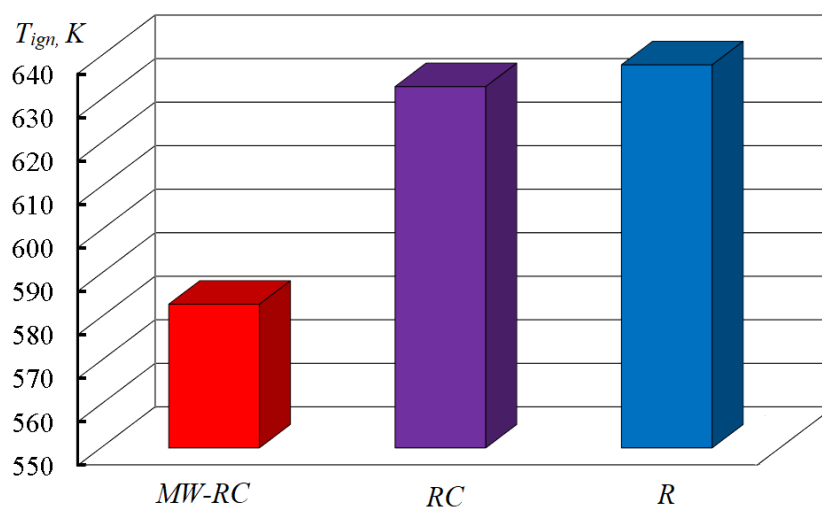


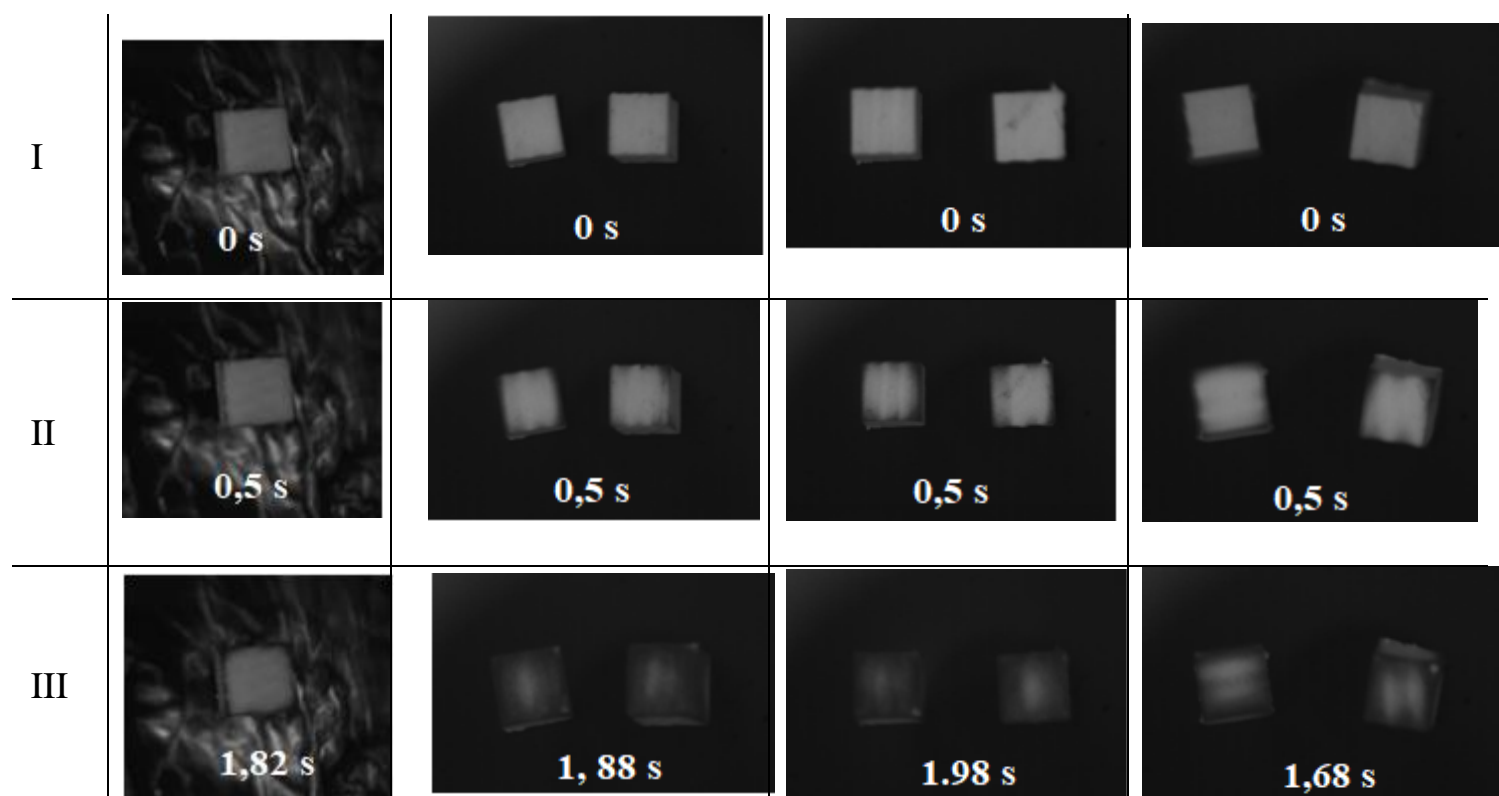
Рисунок 3.23 - Значения предельной температуры термической подготовки

В этой связи можно сказать, что применение микроволнового излучения в технологиях топливосжигания имеет хорошие перспективы в предпусковом и пусковом режимах работы котельного агрегата, а также при сжигании в циркулирующем слоевом предтопке высоковлажной древесной биомассы по аналогии со схемой, приведенной в [81].

### 3.5. Влияние расстояния между частицами древесной биомассы на времена их термической подготовки

На рисунке 3.24 приведены типичные кадры видеogramм процесса термической подготовки двух частиц древесной биомассы (с характерным размером  $\delta=6 \cdot 10^{-3}$  м) кубической формы при различных межосевых расстояниях при температуре внешней среды  $T_g=1073$  К. Анализ кадров показывает, что весь период термической подготовки и зажигания частиц биомассы можно условно разделить на ряд последовательных и взаимосвязанных стадий, каждая из которых характеризуется доминированием одного из процессов: инертный радиационно-конвективный нагрев; термическое разложение, сопровождающееся выходом летучих; газофазное зажигание газообразных продуктов пиролиза.

В экспериментах установлено, что зажигание древесных частиц, как правило, локализуется в районе ребер куба (рисунок 3.24). Это обусловлено тем, что они являются своеобразными «концентраторами» тепловых потоков. Соответственно, температура в таких точках растет значительно быстрее, чем в остальной частице.



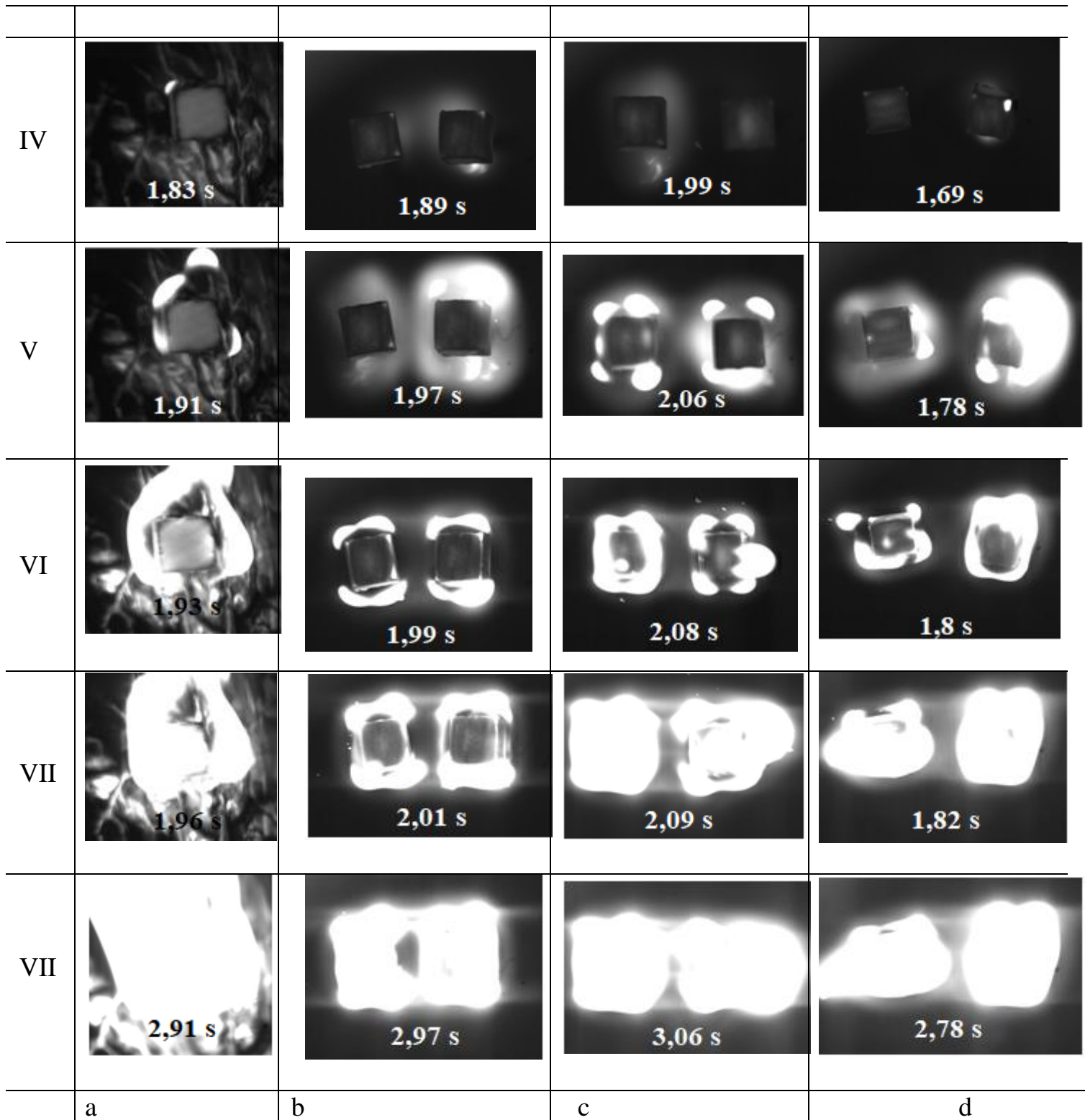


Рисунок. 3.24 - Кадры типичных видеogramм процесса воспламенения частиц с характерным размером  $\delta=6$  мм при температуре окружающей среды  $T_g=1073$  К: а – одна частица; б – две частицы (расстояние  $1,5\delta$ ); с - две частицы (расстояние  $2\delta$ ); д- две частицы (расстояние  $3\delta$ )

Видеограммы экспериментов дают основания для нескольких выводов. Первый - зажигание и одиночных, и группы частиц древесины происходит в газовой фазе на некотором удалении от поверхности частиц (Рис.3.24IV). Этот аспект целесообразно выделить потому, что древесина является пористой средой, в порах которой в обычных условиях всегда есть кислород. Но видеокадры проведённых экспериментов показывают, что первые очаги пламени появляются не на поверхности частицы (так было бы, если бы горение начиналось в порах или даже на выходе из пор на границе раздела «пора-внешняя среда»). Скорее всего, концентрация кислорода воздуха в порах недостаточна для начала реакции интенсивного взаимодействия горючего (газообразных продуктов пиролиза древесины) и окислителя (воздуха) при температурах, соответствующих интенсивному пиролизу древесины. Начало реакции горения на некотором расстоянии от поверхности частицы обусловлено, очевидно, тем что газы – продукты пиролиза при выходе от поверхности частицы во внешнюю окислительную среду недостаточно прогреты, их температура ниже той, при которой начинается горение этих летучих. Последние при движении от поверхности частицы нагреваются до существенно более высоких температур вследствие теплообмена с горячим воздухом, и условия начала горения достигаются на некотором расстоянии от частицы. Вторым выводом – при расстояниях между частицами в диапазоне от 3 мм до 12 мм первая частица не оказывает при  $T=1073$  К заметного влияния на условия и характеристики зажигания второй (Рисунки 3.24.V- 3.24.VI). При изменении расстояния между частицами времена задержки зажигания изменяются в пределах доверительных интервалов определения этой характеристики [86].

На основании результатов выполненных экспериментов можно сделать вывод о том, что при расчете времен задержки зажигания группы частиц древесной биомассы можно, если расстояние между ними более 3 мм, использовать модель зажигания одиночной частицы (например, [87]). Третий вывод – интервал времени от появления первых признаков (области свечения) начала реакции горения на видеокадрах (Рис.3.24 IV) до состояния охвата

пламенем всей частицы не превышает 0,2 с. Эксперименты, проведенные в диапазоне температур внешней среды от 873 К до 1273 К, показали, что при относительно низких  $T$  (ниже 1073 К) влияние второй частицы на условия и характеристики зажигания первой проявляются наглядно. Чем ниже температура воздуха, тем заметней это влияния в случае зажигания частиц малых (3мм) характерных размеров. Для частиц относительно больших (6 мм) размеров такой эффект не зарегистрирован (Рис.316).

На рисунке 3.25 и 3.26 приведены зависимости времен задержки зажигания частиц древесины от температуры внешней среды при различных межосевых расстояниях между двумя частицами.

Можно отметить изменение интенсивности излучения нагретых поверхностей частиц (хорошо видно на рисунке 3.24 III b, c, d) перед газофазным горением летучих 3.24 IV b, c, d). Отсутствие свечения поверхности частиц перед началом их горения обусловлено интенсивным вдувом в области, прилегающие к этим поверхностям газообразных продуктов термического разложения древесины. Эти газы закрывают частицы от объектива видеокамеры, поэтому они и почти не видны на видеокадрах ряда III (рис. 3.24).

Результаты выполненных экспериментов дают основания и для другого важного вывода. Гетерогенное горение частиц древесины (точнее углерода обугленного слоя древесины, остающегося после пиролиза и выхода летучих) начинается через 0,1-0,2 секунды после начала газофазного горения. На видеокадрах рядов V и VI (рис. 3.24) хорошо видно, что пламя покрывает всю поверхность частицы.

Кроме этого, проводя анализ механизмов зажигания частиц древесины в условиях лучистого нагрева можно по видеограммам рядов IV-V (рис. 3.24) сделать вывод, что времен задержки зажигания одиночных частиц отличаются от аналогичных времен группы из двух частиц не более чем на 0,05 секунды.

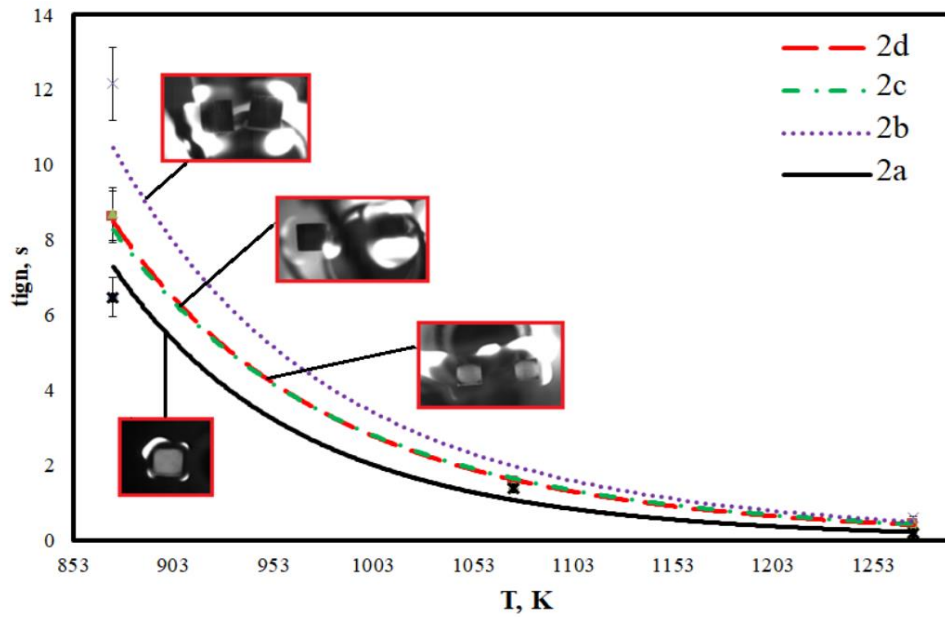


Рисунок 3.25 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температуры внешней среды при разных межосевых расстояниях с характерным размером частиц  $\delta=3,5$  мм

Установленные закономерности (Рис.3.25) обусловлены, скорее всего тем, что в условиях эксперимента (также, как и в топочной среде большинства паровых и водогрейных котлов) доминирует лучистый нагрев частиц. При этом одиночная частица нагревается излучением со всех сторон адекватно. Если же частиц две, то в пространство между ними поток излучения поступает не так как к внешним граням частиц – каждая препятствует нагреву другой, изолируя ее от внешнего потока излучения. Чем меньше расстояние между двумя частицами, тем значительнее это влияние.

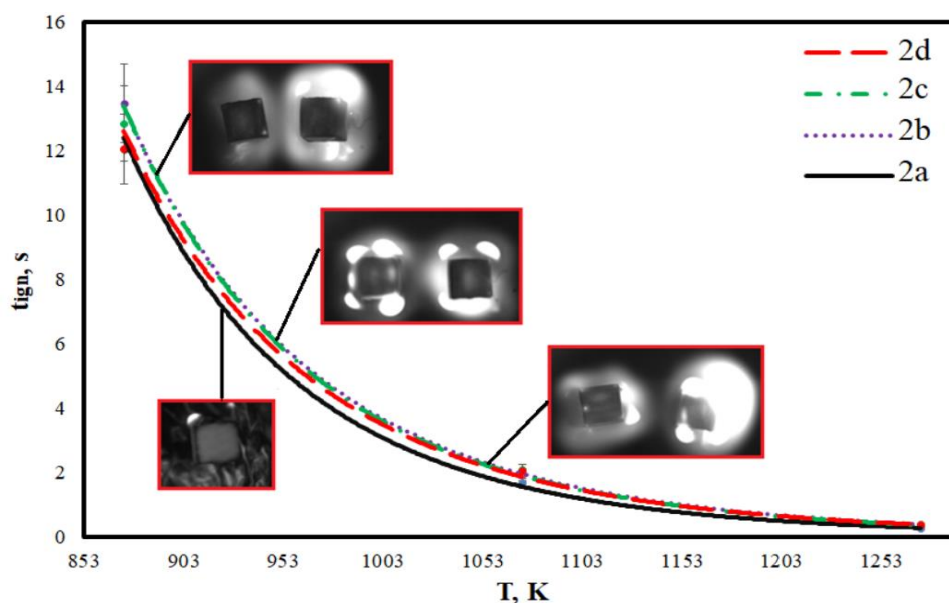


Рисунок 3.26 - Зависимости времен термической подготовки частиц древесной биомассы от температур внешней среды при разных межосевых расстояниях с характерным размером частиц  $\delta=6$  мм

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 (Рис.3.25) в малых окрестностях этих граней. Но уже при расстоянии между частицами 3,5 мм (Рис.3.25) время задержки их зажигания отличалось от  $t_{ign}$  одиночной частицы не более чем на 12%. При дальнейшем росте расстояния между частицами (Рис.3.26) их влияние друг на друга практически отсутствовало. Также можно отметить, что в связи с зависимостью лучистого потока от  $T$  в четвертой степени, рассмотренные эффекты наиболее отчетливо проявлялись при относительно низких температурах.

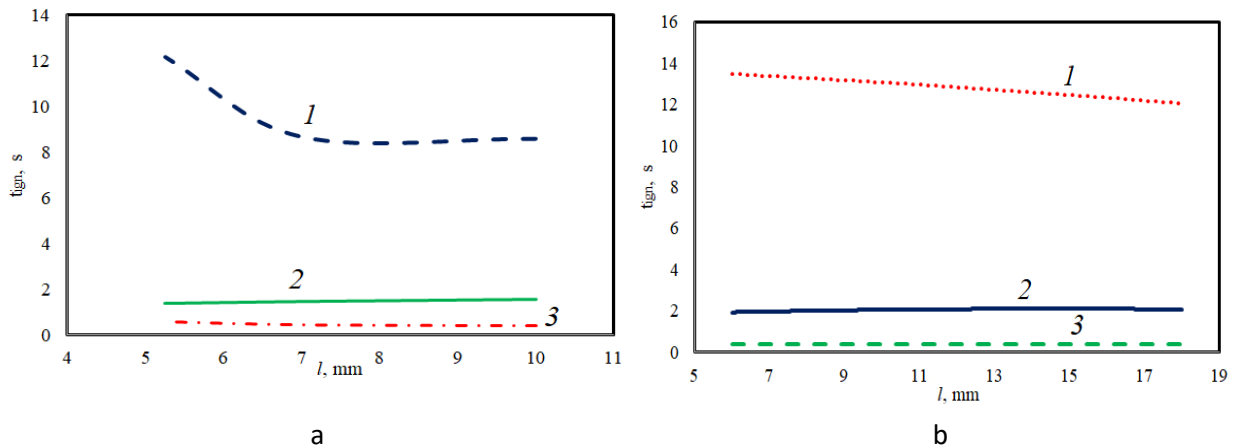


Рисунок 3.27 - Зависимость времен термической подготовки группы из 2-х частиц древесной биомассы от расстояния между ними при характерном размере последних:

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

Где:

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

На рисунках 3.27 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  $\delta=3,5\text{мм}$  (рисунок 3.27а) при  $T_g=873\text{K}$  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 ( $o(t_{ign}^d) \rightarrow t_{ign}^s$ ). Аналогичная картина наблюдается при анализе времен задержки зажигания частиц древесной биомассы с  $\delta=6$  мм (рисунок 3.27б).



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. С целью проверки этой гипотезы проведен сравнительный анализ значений радиационных тепловых потоков ( $Q_{\text{rad}}$ ), падающих на открытую по отношению к источнику нагрева (высокотемпературный воздух) и на затененную (находящейся в области геометрической тени) поверхности частицы биомассы. Рассчитано значение  $Q_{\text{rad}}$  в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 3.28. В этом случае  $Q_{\text{rad}}$  рассчитывается в соответствии с [88] по формуле:

$$Q_{\text{rad}} = \left| \sigma T_{\text{bio}}^4 A_{\text{bio}} - \int_0^{\pi} \sigma T_{\text{h}}^4 F_{\text{bio-h}} A_{\text{h}} d\varphi \right| \quad (1)$$

Где:  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $F_{\text{bio-h}}$  – угловой коэффициент, соответствующих угловой координате  $\varphi$ ;  $A$  – площадь источника (приемника) теплового излучения.

На рисунке 3.28 приведены зависимости тепловых потоков  $Q_{\text{rad}}$ ,  $Q_{\text{rad}}^0$  ( $Q_{\text{rad}}$  – радиационный тепловой поток, падающий на поверхность частиц,  $Q_{\text{rad}}^0$  – радиационный тепловой поток, падающий на полностью свободную (не затененную) поверхность частицы) от расстояния

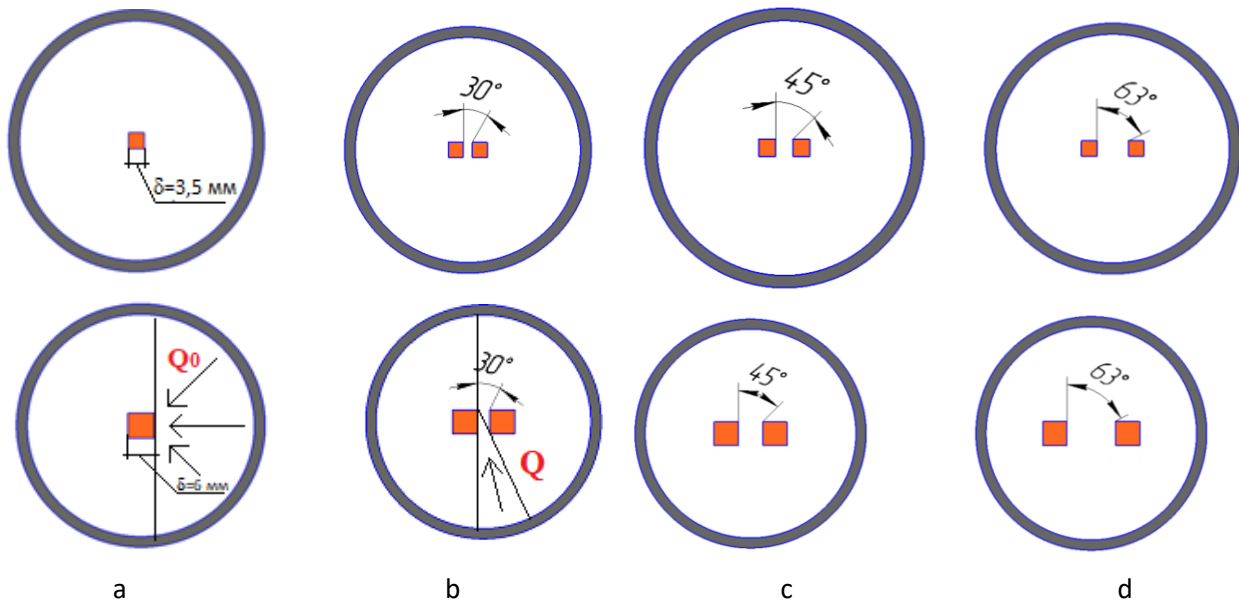


Рисунок 3.28 - Схема расчета радиационных тепловых потоков, падающих на боковые поверхности частицы биомассы при различных расстояниях между частицами биомассы:

a – одна частица; b –  $\delta 1,5$ ; c –  $\delta 2$ ; d –  $\delta 3$ .

Где:  $\delta$  – характерный размер частицы древесины.

между частицами  $l$ . Можно отметить, что при  $l=4,5$  мм радиационный тепловой поток, падающий на внутренние (обращенные друг-другу) грани частиц составляет около 20% от радиационного потока, падающего на полностью открытую для лучистого потока поверхность. При увеличении  $l$  значения  $Q_{\text{rad}} \rightarrow Q_{\text{rad}}^0$ , соответственно можно сказать, что при очень большом расстоянии между частицами биомассы характеристики их нагрева соответствуют характеристикам нагрева одиночных частиц в идентичных условиях теплообмена.

Полученные результаты дают основания для вывода о том, что значения  $\delta$  оказывает влияние на интенсивность лучистого нагрева при воспламенении. Соответственно, можно обосновано предположить, что в реальной практике характеристики и условия зажигания частиц древесной биомассы в пылевоздушном потоке (факеле) могут отличаться в зависимости от их локализации (нахождение на периферии или в ядре потока). Скорее всего,

топливные частицы, движущиеся в центре потока, будут зажигаться медленнее частиц, движущихся на периферии потока топливных частиц.

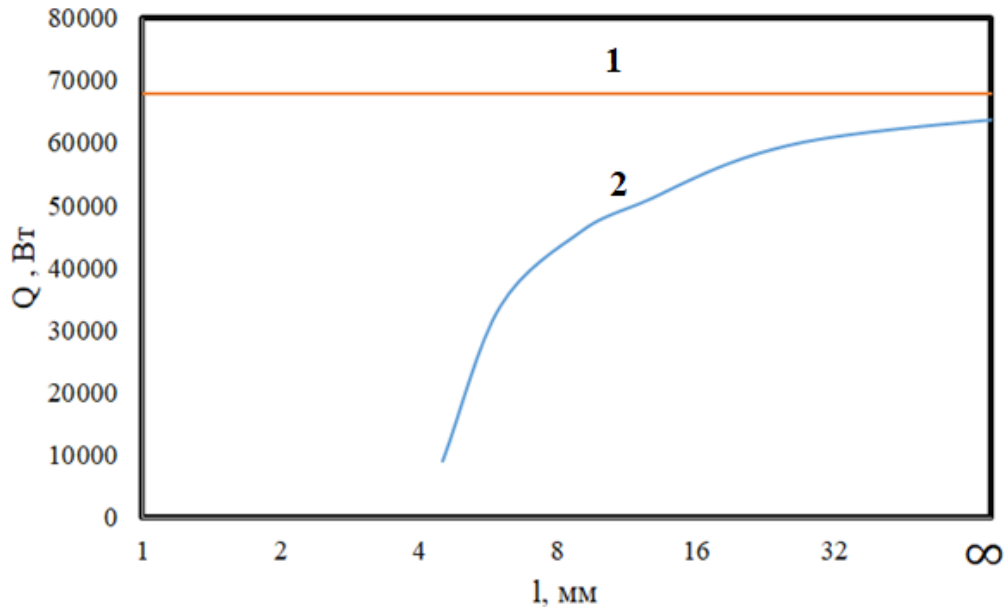


Рисунок 3.29 - Зависимость тепловых потоков  $Q_{\text{rad}}$  (кривая 2),  $Q_{\text{rad}}^0$  (кривая 1) от расстояния  $l$  между частицами биомассы.

Вторым очевидным следствием проведенных исследований является то, что как известно из теории истечения затопленных турбулентных струй [89], диаметр последней в устье и на определенном расстоянии от него существенно отличаются (до нескольких десятков раз). Соответственно, можно обосновано предположить, что характеристики радиационного нагрева группы частиц будут также существенно зависеть не только от расстояния между частицами биомассы, но и от расстояния, которое частицы преодолели после вдува топливовоздушной смеси в топочное пространство до момента зажигания. Расчет межосевого расстояния между частицами применительно к условиям работы типичных горелок сжигающих древесную биомассы [90] показывает, что в зоне вдува пылевоздушной смеси интенсивность радиационного нагрева частиц биомассы будет составлять менее 40% от  $Q_{\text{rad}}$  падающего на поверхность биомассы в зоне их воспламенения. Соответственно, можно обосновано сделать вывод, что характеристики и условия зажигания частиц

древесной биомассы при их движении в потоке пылевоздушной смеси будут существенно зависеть от расстояния от среза горелки, вследствие естественного разлета в топочной камере.

Следует отметить, что в современной теории горения большой совокупности (факела) топливных частиц используется гипотеза о равновесности и изотропности радиационного теплового потока к поверхности этих частиц. Проведенные исследования показывают, что при моделировании зажигания потока частиц древесной биомассы целесообразно учитывать эффекты их затенённости соседними частицами от источника нагрева в условиях их движения в топочном пространстве котельных агрегатов.

### 3.6. Выводы по третьей главе

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

2. Показано, что характерный размер частиц древесины, выполненных в форме куба, не оказывает значимого влияния на характеристики и условия воспламенения.

3. 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 объема времена задержки уменьшаются.

4. При воспламенении частиц древесной биомассы пластинообразной формы увеличение толщины приводит к линейному росту значений  $t_{\text{ign}}$ .

5. В области умеренных температур ( $T \leq 873\text{K}$ ) частицы из сосны зажигаются значительно быстрее частиц из берёзы, кедра и осины.

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

7. Ориентация частицы кубической формы в пространстве не оказывает влияния на характеристики зажигания.

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

9. Микроволновый нагрев частиц древесины приводит к снижению времен термической подготовки последних.

## 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  $t_{ign}$  одной частицы

### ОБОЗНАЧЕНИЯ

$C^{daf}$  – содержание углерода на сухое беззольное состояние, %;

$Q_i^r$  – высшая теплота сгорания, МДж/кг;

$V^{daf}$  – выход летучих веществ на сухую беззольную массу топлива, %;

$C_p$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);

$\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);

$\rho$  – плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$t_{ign}$  – время термической подготовки, с;

$T_g$  – температура окислителя, К;

$\delta$  – характерный размер, мм;

$\varphi$  – относительная влажность, %;

$Q_T$  – теплотворная способность, Дж/кг.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. R. M. Santosa, R. Bakhshoodeh, Climate change/global warming/climate emergency versus general climate research: comparative bibliometric trends of publications. *Heliyon* 7 (11) (2021) e08219.
2. Mukunda M. Gogoi, S. Suresh Babu, Santosh K. Pandey, Vijayakumar S. Nair, Aditya Vaishya, I.A. Girach, N. Koushik. Scavenging ratio of black carbon in the Arctic and the Antarctic. *Polar Science* 16 (2018) 10-22.
3. Volodymyr Sydorenko, Sergiy Yeremenko, Viola Vambolb, Sergij Vambolc, Liubov Poberezhna. Distribution and influence of forest fires on the ecological and radiation situation in radioactively contaminated areas. *Procedia Structural Integrity* 36 (2022) 318-325.
4. G. Bera, K. Camargo, J.L. Sericano, Y. Liu, S.T. Sweet, J. Horney, M. Jun, W. Chiu, I. Rusyn, T.L. Wade, A.H. Kna. Baseline data for distribution of contaminants by natural disasters: results from a residential Houston neighborhood during Hurricane Harvey flooding. *Heliyon* 5 (11) (2019) e02860.
5. E.A. Virtanen, J. Lappalainen, M. Nurmi, M. Viitasalo, M. Tikanmaki, J. Heinonen, E. Atlaskin, M. Kallasvuo, H. Tikkanen, A. Moilanen. Balancing profitability of energy production, societal impacts and biodiversity in offshore wind farm design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 158 (2022) 112087.
6. P. Sabarish, R. Karthick, A. Sindhu, N. Sathiyathan. Investigation on performance of solar photovoltaic fed hybrid semi impedance source converters. *Materials Today: Proceedings*. 45 (2) (2021) 1597-1602
7. Changbo Wang, Lixiao Zhang, Yuan Chang, Mingyue Pang. Energy return on investment (EROEI) of biomass conversion systems in China: Meta-analysis focused on system boundary unification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 137 (2021) 110652
8. Ferruccio Ferroni, Robert J. Hopkirk. Energy Return on Energy Invested (ERoEI) for photovoltaic solar systems in regions of moderate insolation. *Energy Policy* 94 (2016) 336-344



9. Pai Liu, Franz Trieb. Transformation of the electricity sector with thermal storage power plants and PV – A first conceptual approach. *Journal of Energy Storage* 44 (2021) 103444
10. Wojciech Stanek, Jan Szargut, Zygmunt Kolenda, Lucyna Czarnowska. Exergo-ecological and economic evaluation of a nuclear power plant within the whole life cycle. *Energy* 117 (2) (2016) 369-377
11. O.M. Babatunde, J.L. Munda, Y. Hamam. Off-grid hybrid photovoltaic – micro wind turbine renewable energy system with hydrogen and battery storage: Effects of sun tracking technologies. *Energy Conversion and Management* 255 (2022) 115335
12. Roman Sheps, Pavel Golovinsky, Sergey Yaremenko, Tatyana Shchukina. New passive solar panels for Russian cold winter conditions. *Energy and Buildings* 248 (2021) 111187
13. Amir Ghaedi, Hamed Gorginpour. Generated power enhancement of the barrage type tidal power plants. *Ocean Engineering* 226 (2021) 108787
14. Subhadeep Bhattacharjee, Pabitra Kumar Nayak. PV-pumped energy storage option for convalescing performance of hydroelectric station under declining precipitation trend. *Renewable Energy*, 135 (2019) 288-302
15. James A.Kirk, Philip A.Studer. Flywheel energy storage—II: Magnetically suspended superflywheel. *International Journal of Mechanical Sciences* 19 (4) 1977,233-245
16. Asmae Berrada, Anisa Emrani, Arechkik Ameer. Life-cycle assessment of gravity energy storage systems for large-scale application. *Journal of Energy Storage*. 40 (2021) 102825
17. Jialong Liu, Qiangling Duan, Kaixuan Qi, Yujun Liu, Jinhua Sun, Zhirong Wang, Qingsong Wang. Capacity fading mechanisms and state of health prediction of commercial lithium-ion battery in total lifespan. *Journal of Energy Storage* 46 (2022) 103910
18. Akhil Hannegudda Ganesh, Bin Xu. A review of reinforcement learning based energy management systems for electrified powertrains: Progress, challenge,

and potential solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 154 (2022) 111833

19. Peter S. Pacheco. *An Introduction to Parallel Programming*. University of San Francisco (2011) <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374260-5.00012-9>

20. Dold A. *Lectures on algebraic topology*. New York. 1976

21. Mikkel Thorup. Near-optimal fully[sic]-dynamic graph connectivity. *Proceeding STOC '00 Proceedings of the thirty-second annual ACM symposium on Theory of computing*. Portland: Association for Computing Machinery, 2000. 21–23 5. p. 343–350. doi:10.1145/335305.335345.

22. J. Zhou, T. Tabata. Economic, societal, and environmental evaluation of woody biomass heat utilization: A case study in Kobe, Japan. *Renewable Energy* Available online (2022)

23. B. Vandecasteele, Ch. Boogaerts, E. Vandaele. Combining woody biomass for combustion with green waste composting: Effect of removal of woody biomass on compost quality. *Waste Management* 58 (2016) 169-180

24. Joao Pedro Silva, Senhorinha Teixeira, Elson Grilo, Bernhard Peters, Jose Carlos Teixeira. Analysis and monitoring of the combustion performance in a biomass power plant. *Cleaner Engineering and Technology* 5 (2021) 100334

25. Andrei Briones-Hidrovo, Jose Copa, Luís A.C. Tarelho, Catia Gonçalves, Tamiris Pacheco da Costa, Ana Claudia Dias. Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion. *Journal of Cleaner Production* 289 (2021) 125680

26. Thomas G. Kreutz, Eric D. Larson, Cristina Elsidio, Emanuele Martelli, Chris Greig, Robert H. Williams. Techno-economic prospects for producing Fischer-Tropsch jet fuel and electricity from lignite and woody biomass with CO<sub>2</sub> capture for EOR. *Applied Energy* 279 (2020) 115841

27. Eirik Ognér Jåstad, Torjus Folsland Bolkesjø, Erik Trømborg, Per Kristian Rørstad. The role of woody biomass for reduction of fossil GHG emissions in the future North European energy sector. *Applied Energy* 274 (2020) 115360

28. Kuznetsova G.V., Yankovski S.A. Conditions and Characteristics in Ignition of Composite Fuels Based on Coal with the Addition of Wood. *Thermal Engineering*. 66 (2019) p.133–137
29. Julia Hansson, Göran Berndes, Filip Johnsson, Jan Kjærstad. Co-firing biomass with coal for electricity generation—An assessment of the potential in EU27. *Energy Policy* 37 (2009) 1444–1455
30. Kuznetsova G. V., Yankovskii S. A., Tolokol'nikova A.A., Cherednika I.V Mechanism of the Suppression of Sulfur Oxides in the Oxidative Thermolysis Products of Coals upon Their Combustion in a Mixture with Dispersed Wood. *Solid Fuel Chemistry*. 54 (2020) p.311–317
31. Bright Asante, Hanzhou Ye, Martin Nopens, Goran Schmidt, Andreas Krause. Influence of wood moisture content on the hardened state properties of geopolymer wood composites. *Composites Part A*. 152 (2022) 106680
32. Jos´e Luis Míguez, Jacobo Porteiro, Frank Behrendt, Diana Blanco, David Patino, Alba Dieguez-Alonso. Review of the use of additives to mitigate operational problems associated with the combustion of biomass with high content in ash-forming species. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 141 (2021)110502
33. Liang Wang, Johan E. Hustad, Øyvind Skreiberg, Geir Skjevraak, Morten Grønli. A critical review on additives to reduce ash related operation problems in biomass combustion applications. *Energy Procedia* 20 (2012) 20-29
34. John Matthew Clancy, John Curtis, Brian Ó'Gallachóir. Modelling national policy making to promote bioenergy in heat, transport and electricity to 2030 – Interactions, impacts and conflicts. *Energy Policy*. 123 (2018) 579-593
35. Burak Ulusoy, Bozidar Anicic, Weigang Lin, Bona Lu, Wei Wang, Kim Dam-Johansen, Hao Wu. Interactions in NOX chemistry during fluidized bed co-combustion of residual biomass and sewage sludge. *Fuel*. 294 (2021) 120431
36. Isabel Malico, Ricardo Nepomuceno Pereira, Ana Cristina Gonçalves, Adélia M. O. Sousa. Current status and future perspectives for energy production from solid biomass in the European industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 2019, 960-977

37. Tara Joy Massad, Griffin L. Williams, Mac Wilson, Colleen Elizabeth Hulse, Erin Deery, Lee E. Bridges. Regeneration dynamics in old-growth urban forest gaps. *Urban Forestry & Urban Greening*, 43, 2019, 126364
38. Jesse D. Young, Nathaniel M. Anderson, Helen T. Naughton, Katrina Mullan. Economic and policy factors driving adoption of institutional woody biomass heating systems in the U.S. *Energy Economics*, 69, 2018, 456-470
39. Maria Nordborg, Göran Berndes, Ioannis Dimitriou, Annika Henriksson, Blas Mola-Yudego, Håkan Rosenqvist. Energy analysis of poplar production for bioenergy in Sweden. *Biomass and Bioenergy*, 112, 2018, 110-120
40. Jones Agyei Kumi, Boateng Kyereh, Michael Ansong, Winston Asante. Influence of management practices on stand biomass, carbon stocks and soil nutrient variability of teak plantations in a dry semi-deciduous forest in Ghana. *Trees, Forests and People*, e 3, 2021, 100049
41. Kuznetsov, G.V., Jankovsky, S.A., Tolokolnikov, A.A., Zenkov, A.V. Mechanism of Sulfur and Nitrogen Oxides Suppression in Combustion Products of Mixed Fuels Based on Coal and Wood, *Combustion Science and Technology*, 191, Issue 11, 2019, 2071-2081.
42. Lasse Tobiasen, Randi Skytte, Lars Storm Pedersen, Søren Thaaning Pedersen, Martin A. Lindberg. Deposit characteristic after injection of additives to a Danish straw-fired suspension boiler. *Fuel Processing Technology*, 88, Issues 11–12, December 2007, Pages 1108-1117
43. Alan Carneiro, Diegode Oliveira, Matheus Rocha, Marcelo Silva, Danielle Guerra, Manoel Nogueira. Performance quantification of a cyclonic boiler using biomass sawdust. *Energy Procedia*, 120, 2017, 403-409
44. Jie Ren, Jing-Pei Cao, Xiao-Yan Zhao, Fei-Long Yang, Xian-Yong Wei. Recent advances in syngas production from biomass catalytic gasification: A critical review on reactors, catalysts, catalytic mechanisms and mathematical models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 116, 2019, 109426

45. Aihua Liu, Jieyun Chen, Xiaofei Huang, Junjiang Lin, Xiaochun Zhang, Wenbin Xu. Explosion parameters and combustion kinetics of biomass dust. *Bioresource Technology*, 294, 2019, 122168
46. Pin-Wei Li, Chien-Song Chyang. A comprehensive study on NO<sub>x</sub> emission and fuel nitrogen conversion of solid biomass in bubbling fluidized beds under staged combustion. *Journal of the Energy Institute*, Available online 6 March 2019
47. Ebubekir Siddik Aydin, Ozgun Yucel, Hasan Sadikoglu. Experimental study on hydrogen-rich syngas production via gasification of pine cone particles and wood pellets in a fixed bed downdraft gasifier. *International Journal of Hydrogen Energy* , Volume 44, Issue 32, 28 June 2019, 17389-17396
48. B. Peña, C. Bartolomé, A. Gil. Analysis of thermal resistance evolution of ash deposits during co-firing of coal with biomass and coal mine waste residues. *Fuel* 194 (2017) 357-367
49. Q. Liu, W. Zhong, A. Yu, Chi-Hwa Wang. Co-firing of coal and biomass under pressurized oxy-fuel combustion mode: Experimental test in a 10 kWth fluidized bed. *Chemical Engineering Journal*. (2021) 133457
50. I. Oluwoye, M. Altarawneh, J. Gore, B.Z. Dlugogorski. Products of incomplete combustion from biomass reburning. *Fuel*. 274 (2020) 117805
51. Yuan Lv, Liang Xu, Yanqing Niu, Guangyao Wang, Yu Lei, Haiyu Huang, Shi'en Hu. Investigation on ash deposition formation during co-firing of coal with wheat straw. *Journal of the Energy Institute* 100 (2022) 148–159
52. S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, Zh.A. Kostoreva, I.K. Zabrodina, D.Yu. Malyshev. Ignition of a group of the woody biomass particles. *Thermal Science and Engineering Progress*. 25 (2021) 101017
53. É. Trudel, W.L.H. Hallett, E. Wiens, J.D.O'Neil, M.K. Busigin, D. Berdusco. Fuel particle shape effects in the packed bed combustion of wood. *Combustion and Flame*. 198 (2018) 100-111

54. A.A.A. Abuelnuor, M.A. Wahid, Seyed Ehsan Hosseini, A. Saat, Khalid M. Saqr, Hani H. Sait, M. Osman. Characteristics of biomass in flameless combustion: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 33 (2014) 363 - 370
55. M.X. Fang, D.K. Shen, Y.X. Li, C.J. Yu, Z.Y. Luo, K.F. Cen. Kinetic study on pyrolysis and combustion of wood under different oxygen concentrations by using TG-FTIR analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 77 (2006) 22-27
56. S. Wang, C. Zou, C. Lou, H. Yang, Mei Mei, H. Jing, S. Cheng. Effects of hemicellulose, cellulose and lignin on the ignition behaviors of biomass in a drop tube furnace. *Bioresource Technology*. 310 (2020) 123456
57. S. Wang, C. Zou, H. Yang, C. Lou, S. Cheng, C. Peng, C. Wang, Huiruo Zou. Effects of cellulose, hemicellulose, and lignin on the combustion behaviours of biomass under various oxygen concentrations. *Bioresource Technology*. 320 (2021) 124375.
58. B. Castells, I. Amez, L. Medic, N. Fernandez-Anez, J. Garcia-Torrent. Study of lignocellulosic biomass ignition properties estimation from thermogravimetric analysis. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 71 (2021) 104425
59. Y. Haseli, J.A. van Oijen, L.P.H. de Goey. A detailed one-dimensional model of combustion of a woody biomass particle. *Bioresource Technology* 102 (2011) 9772-9782
60. Md.R. Karim, A.A. Bhuiyan, A.A.R.S. Jamal Naser. CFD simulation of biomass thermal conversion under air/oxy-fuel conditions in a reciprocating grate boiler. *Renewable Energy*. 146 (2020) 1416-1428
61. P.L. Simona, P. Spiru, V. Ion. Mathematical modelling of sawdust drying process for biomass pelleting. *Energy Procedia* 141 (2017) 150-154
62. Y. Wang, Y. Li, C. Zhang, L. Yang, X. Fan, L. Chu. A study on co-pyrolysis mechanisms of biomass and polyethylene via ReaxFF molecular dynamic simulation and density functional theory. *Process Safety and Environmental Protection*. 150 (2021) 22-35

63. M.E. Mostafa, Y.M. Khedr, P. Ling, H. Chi, S. Hu, Yi Wang, S. Su, S.A. Elsayed, J. Xiang. Experimental and numerical modelling of solid and hollow biomass pellets high-temperature rapid oxy-steam combustion: The effect of integrated CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O concentration. *Fuel*. 303 (2020) 121249
64. Hesameddin Fatehi, Wubin Weng, Mário Costa, Zhongshan Li, Miriam Rabaçal, Marcus Aldén, Xue-Song Bai. Numerical simulation of ignition mode and ignition delay time of pulverized biomass particles. *Combustion and Flame*, 206, August 2019, 400-410
65. G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva, A. A. Kostoreva, Zh. A. Kostoreva. Ignition of the wood biomass particles under conditions of near-surface fragmentation of the fuel layer. *Fuel*, 252, 15 September 2019, 19-36
66. Hao Zhou, Yuan Li, Ning Li, Kefa Cen. Experimental investigation of ignition and combustion characteristics of single coal and biomass particles in O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> and O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O. *Journal of the Energy Institute*. Volume 92, Issue 3, 2019, 502-511
67. Kun Zhou, Qizhao Lin, Hu. Hongwei, Fupeng Shan, Fu. Wei, Po Zhang, et al. Ignition and combustion behaviors of single coal slime particles in CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> atmosphere. *Combust Flame*, 194, (2018), 250-263
68. Fupeng Shan Qizhao Lin, Kun Zhou, Yakun Wu, Wei Fu, Po Zhang, Lanbo Song, Chunyu Shao, Bolun Yi. An experimental study of ignition and combustion of single biomass pellets in air and oxy-fuel. *Fuel*, 188, 2017, 277-284
69. G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, N. Y. Gutareva. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy*, 145, January 2020, 1474-1486
70. G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, A. A. Kostoreva, Zh. A. Kostoreva, N. A. Nigay. Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process. *Fuel*, 274, 2020, 117843
71. D.O. Glushkov, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy. Evolution of temperature of a droplet of liquid composite fuel interacting with heated airflow. *Thermophysics and Aeromechanics*. 23 №6 (2016) 887 - 898

72. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals. *Energy*. 150 (2018) 262 – 275.
73. J. Cao, H. Liu, B. Zhao, Z. Li, D.M. Drew, X. Zhao. Species-specific and elevation-differentiated responses of tree growth to rapid warming in a mixed forest lead to a continuous growth enhancement in semi-humid Northeast Asia. *Forest Ecology and Management*. 448 (2019) 76-84
74. F. Sher, M.A. Pans, D.T. Afilaka, C. Sun, H. Liu. Experimental investigation of woody and non-woody biomass combustion in a bubbling fluidised bed combustor focusing on gaseous emissions and temperature profiles. *Energy*. 141 (2017) 2069-2080
75. C.Di Blasi. Physico-chemical processes occurring inside a degrading two-dimensional anisotropic porous medium. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41 (1998) 4139-4150
76. V.N. Vilyunov The theory of ignition of condensed matter. Novosibirsk: Science, Siberian Branch, 1984.
77. Крайнов А.В. Лабораторный практикум по теоретическим основам теплотехники/ А.В. Крайнов, А.А. Ташлыков, В.Е. Юхнов. – Томск: Изд-во ТПУ, 2014. – 112 с.
78. G.V.Kuznetsov, S.V.Syrodoy, N.Y.Gutareva. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy* 145 (2020) 1474-1486
79. J.K.Tanui, P.N.Kioni, T.Mirre, M.Nowitzki, N.W.Karuri. The influence of particle packing density on wood combustion in a fixed bed under oxy-fuel conditions. *Energy* 194 (2020) 116863
80. Frederic Bu, Siegmund Wirtz, Viktor Scherer. Influence of stoking on the combustion of beech wood particles of different shape in an agitated bed. *Experimental Thermal and Fluid Science* 95 (2018) 27-34



81. Élizabeth Trudel, William L. H. Hallett, Evan Wiens, Jeremiah D. O'Neil, Marina K. Busigin, Dana Berdusco. Fuel particle shape effects in the packed bed combustion of wood. *Combustion and Flame* 198 (2018) 100-111
82. D.O. Glushkov, A.V. Zakharevich, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy. Evolution of temperature of a droplet of liquid composite fuel interacting with heated airflow. *Thermophysics and Aeromechanics*. 23 №6 (2016) 887 - 898
83. D.O. Glushkov, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak, S.V. Syrodoy. Mathematical model simulating the ignition of a droplet of coal water slurry containing petrochemicals. *Energy*. 150 (2018) 262 – 275.
84. S.V. Syrodoy, G.V. Kuznetsov, Zh.A. Kostoreva, I.K. Zabrodina, D.Yu. Malyshev. Ignition of a group of the woody biomass particles. *Thermal Science and Engineering Progress*. 25 (2021) 101017
85. J. Cao, H. Liu, B. Zhao, Z. Li, D.M. Drew, X. Zhao. Species-specific and elevation-differentiated responses of tree growth to rapid warming in a mixed forest lead to a continuous growth enhancement in semi-humid Northeast Asia. *Forest Ecology and Management*. 448 (2019) 76-84
86. Ermakov S.M., Brodsky V.Z., Zhiglyavsky A.A. and other *Mathematical theory of experiment planning*. M.: FIZMATLIT, 1983. - 392 c.
87. G. V. Kuznetsov, S.V.Syrodoy, N. Y. Gutareva. Influence of a wet wood particle form on the characteristics of its ignition in the high-temperature medium. *Renewable Energy*. 145, 2020, Pages 1474-1486
88. Siegel R., Howell J.R. Mengüç M. P. *Thermal Radiation Heat Transfer*. CRC Press 2020, 1040
89. Abramovich G.N. *Turbulent free jets of liquids and gases*. Publisher: Gosenergoizdat, 1948, 720
90. Arafat A. Bhuiyan, Jamal Naser. CFD modelling of co-firing of biomass with coal under oxy-fuel combustion in a large scale power plant. *Fuel*, 159, 2015, 150-168