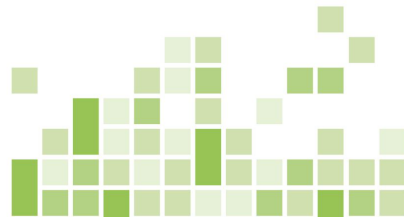




ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНО- УГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

Соискатель: **Косторева Ж. А.**

Научный руководитель: **д.ф.-м.н., профессор Кузнецов Г. В.**

Томск 2022

# Обоснование соответствия темы диссертации специальности 05.14.04 – промышленная теплоэнергетика

**Теплотехника** - отрасль науки и техники, охватывающая методы получения и использования тепловой энергии [1].

**Паспорт специальности 05.14.04 Промышленная теплоэнергетика**

**Формула специальности:**

Научная специальность, объединяющая исследования по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем, по разработке и созданию нового и наиболее совершенного **теплотехнического оборудования**. В рамках специальности ведется поиск структур и принципов действия **теплотехнического оборудования, которые обеспечивают сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции, сбережение материальных ресурсов, направляемых на изготовление теплопередающего и теплоиспользующего оборудования, защиту окружающей среды.**

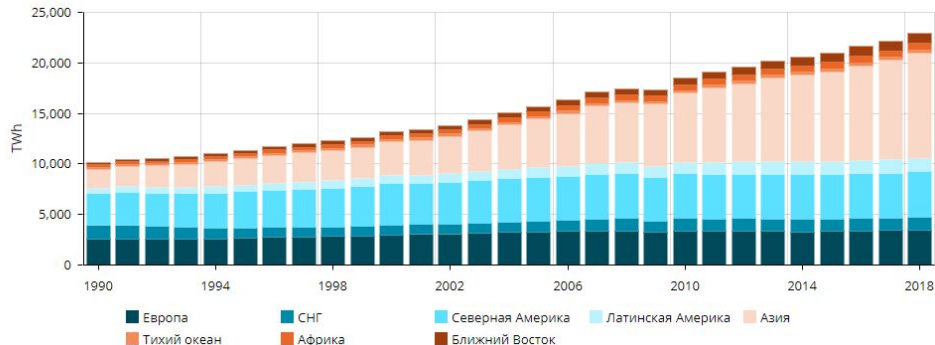
**Области исследований:**

Разработка **научных основ** сбережения энергетических ресурсов в **промышленных теплоэнергетических устройствах**

**Научные основы.**

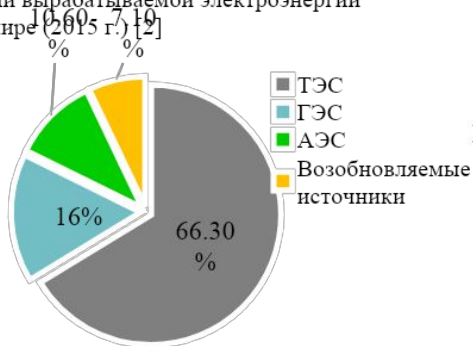
*Диссертация посвящена разработке научных основ сбережения энергетических ресурсов (угля) в котельных установках промышленной теплоэнергетики (отходы лесопиления не являются ресурсом) путем частичной замены угля на древесную биомассу. Такая замена возможна только при обосновании рабочих параметров древесно-угольных смесей (в первую очередь времен термической подготовки).*

# Актуальность темы диссертации

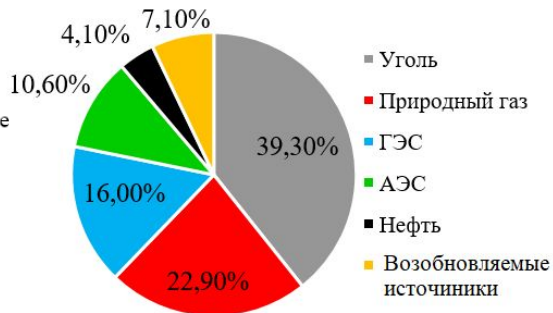


Потребление электроэнергии в мире в период с 1990 года по 2018 год [1]

Доли вырабатываемой электроэнергии в мире (2015 г.) [2]



Доли различных источников в мировом производстве электроэнергии (2015 г.) [2]



# Проблемы угольно энергетике



Большой объем  
золошлаковых отходов [1]

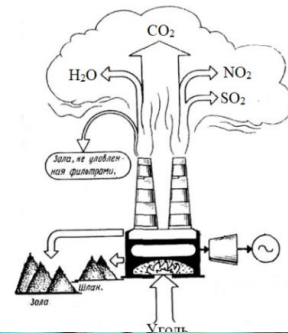
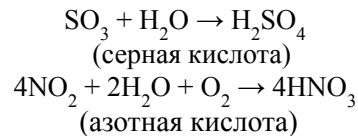
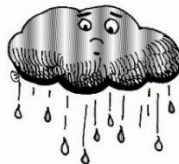


Рост концентрации  
CO<sub>2</sub> в атмосфере  
приводит к  
изменению климата  
[7]

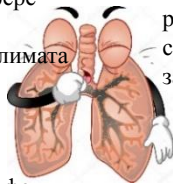


Радиоактивный фон  
вблизи золоотвалов  
выше, чем фон вблизи  
атомной станции [5]

Выбросы оксидов  
серы и азота причины  
кислотных дождей [2]



Выбросы причина  
респираторных и  
сердечно-сосудистых  
заболеваний [4]



Истощение  
озонового слоя  
Земли [6]



[1] Veksha, Apostolos Giannis, Leena Hupa, Grzegorz Lisak. High temperature slagging gasification of municipal solid waste with biomass char as a greener auxiliary fuel. Journal of Hazardous Materials 423 (2022) 127057

[2] Paul Breeze. Chapter 4 - Combustion Plant Emissions: Sulfur Dioxide, Nitrogen Oxides, and Acid Rain. Electricity Generation and the Environment. 2017, 33-47

[3] Fabrizio Minichilli, Francesca Gorini, Elisa Bustaffa, Liliana Cori, Fabrizio Bianchi. Mortality and hospitalization associated to emissions of a coal power plant: A population-based cohort study. Science of The Total Environment. 694, 2019, 133757

[4] Konstantin Kovler. Legislative aspects of radiation hazards from both gamma emitters and radon exhalation of concrete containing coal fly ash. Construction and Building Materials. 25, 2011, 3404-3409

[5] Margarita A. Dmitrienko, Pavel A. Strizhak. Coal-water slurries containing petrochemicals to solve problems of air pollution by coal thermal power stations and boiler plants: An introductory review. Science of The Total Environment, 613, 2018, 1117-1129

[6] A.K. Singh, Asheesh Bhargawa. Atmospheric burden of ozone depleting substances (ODS) and forecasting ozone layer recovery, Atmospheric Pollution Research, 10 (2019) 802-807

[7] Sijian Jiang, Xiangzheng , DengGang , LiuFan Zhang. Climate change-induced economic impact assessment by parameterizingspatially heterogeneous CO2 distribution. Technological Forecasting & Social Change 167 (2021) 120668

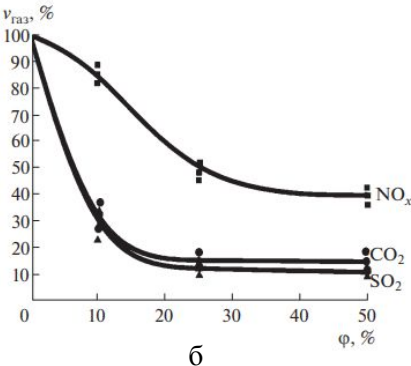
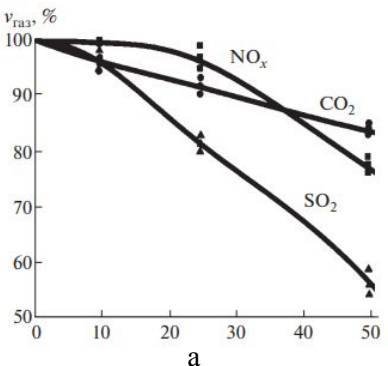
# Выбросы оксидов серы и азота при совместном сжигании угля с древесной биомассой

Основные вредные выбросы, образующиеся при сжигании угля

SO<sub>x</sub>

NO<sub>x</sub>

CO<sub>2</sub>



Концентрации выбросов при термическом разложении смесевых топлив на основе углей марок Д (а), Т (б); φ – доля древесины в топливе [1]

[1] С.А. Янковский, Г. В. Кузнецов Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве. Химия твердого топлива 1 (2019) 26-33

# ТЭС и ТЭЦ сжигающие уголь с добавками древесной биомассы

В пылевидном состоянии [1]

Страна	Место нахождения	Выход (Мвт)	Доля биомассы	Основное топливо	Совместное сжигание топлива
Австрия	St. Andrä	124	3%	Угольная пыль	Щепки
Германия	Lübbenau	100	7%	Угольная пыль	Дерево, солома
Нидерланды	Nijmegen	602		Угольная пыль	Измельченная древесина
Соединенное Королевство	-	1085		Угольная пыль	Древесина
Польша	Skawina	590	10%	Угольная пыль	Опилки, кофейная скорлупа
Польша	Rybnik	1800	10%	Угольная пыль	Опилки, щепа
Польша	Polaniec	1800	10%	Угольная пыль	Опилки, щепа

В кипящем слое [1]

Страна	Место нахождения	Выход (Мвт)	Доля биомассы	Основное топливо	Совместное сжигание топлива
Финляндия	Lohja	36		Каменный уголь	Древесные отходы, бумажные отходы
Финляндия	Outokumpu	24		Каменный уголь	Торф, древесные отходы
Финляндия	Pieksamaki	20		Каменный уголь	Торф, древесные отход

[1] Fouad Al-Mansour, Jaroslaw Zuwała. An evaluation of biomass co-firing in Europe. Biomass and Bioenergy 91 (2010) 620-629

# ТЭС и ТЭЦ сжигающие уголь с добавками древесной биомассы

ЦКП [1]

Страна	Место нахождения	Выход (Мвт)	Доля биомассы	Основное топливо	Совместное сжигание топлива
Австрия	Ebensee	38		Каменный уголь	Бурый уголь, газ, нефть, древесина
Финляндия	Kokkola	98		Каменный уголь	Торф, древесина
Финляндия	Kuhmo	18		Каменный уголь	Торф, древесные отходы
Финляндия	Lieska	22		Каменный уголь	Торф, кора, опилки
Финляндия	Mikkeli	84		Каменный уголь	Бурый уголь, древесные отходы, нефть, газ
Финляндия	Rauma			Каменный уголь	Торф, древесные отходы
Норвегия	Sande	160		Каменный уголь	Торф, шлам, кора
Испания	La Pereda	50		Каменный уголь	Дерево
Швеция	Fors	55		Каменный уголь	Древесина, кора
[1] Fouad Al-Mansour, Jaroslaw Zuwala.	An evaluation of biomass co-firing in Europe. Biomass and Biopower, 31 (2010) 620-629				
	Norrkoping	125		Каменный уголь	Древесина

При сжигании биомассы совместно с углем в топках водогрейных котлов возможно существенное сбережение топливных ресурсов и снижение антропогенной нагрузки предприятий промышленной теплоэнергетики (в первую очередь теплоэлектроцентралей и котельных) на окружающую среду.

Но пока такие технологии топливосжигания используются редко

## Проблема

В настоящее время отсутствует фундаментальное обоснование (по результатам экспериментов) основных параметров технологий сжигания угля совместно с древесной биомассой в топках котельных агрегатов промышленной теплоэнергетики.



# Исследователи, изучавшие и изучающие процессы термической подготовки и горения древесно-угольных топлив:

## В Мире

Frederic Bu , Siegmar Wirtz, Viktor Scherer, J.K. Tanui, P.N. Kioni, T. Mirre, M. Nowitzki, N.W. Karuri, Y. Haseli, J.A. van Oijen, L.P.H. de Goeij, Arvind Atreya, Pawel Olszewski, Yawei Chen, Howard R. Baum, Elizabeth Trudel, William L.H. Hallett, Evan Wiens, Jeremiah D. O'Neil, Marina K. Busigin, Dana Berdusco, Arafat A. Bhuiyan, Aaron S. Blicblau, A.K.M. Sadrul Islam, Jamal Naser, D.T. Pio, L.A.C. Tarelho, T.F.V. Nunes, M.F. Baptista, M.A.A. Matos, Jonathan D. Morris, Syed Sheraz Daood , Stephen Chilton, William Nimmo, A.A. Khan, W. de Jong, P.J. Jansens, H. Spliethoff, A.A.A. Abuelnuor, M.A. Wahid, Seyed Ehsan Hosseini, A. Saat, Khalid M. Saqr, Hani H. Sait, M. Osman

## В Российской Федерации

Янковский С.А., Сыродой С.В., Стрижак П. А., Глушков Д. О., Няшина Г. С., Вершинина К. В.

## Цель работы

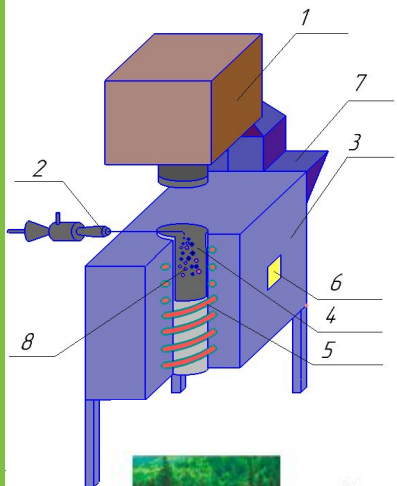
Обоснование возможности сбережения энергетических ресурсов и более эффективной защиты окружающей среды при работе объектов промышленной теплоэнергетики в результате использования в качестве топлив водогрейных котлов смесей на основе углей и древесины.

## Для достижения цели были поставлены и решены следующие задачи:

1. Разработка экспериментального стенда и методики эксперимента для исследований процессов термической подготовки древесно-угольных смесей.
2. Установление по результатам экспериментов основных закономерностей термической подготовки смесей измельченных угля и древесины.
3. Оценка степени влияния вида биомассы на основные характеристики термической подготовки композитных био-угольных топлив.
4. Установление влияния концентрации древесины и расположения частиц био-угольных топлив относительно друг друга на характеристики и условия их термической подготовки.
5. Определение наиболее перспективного (с целью минимизации времён термической подготовки) соотношения компонент в смеси уголь/древесина.
6. Обоснование возможности эффективного сжигания древесно-угольных смесей в условиях,

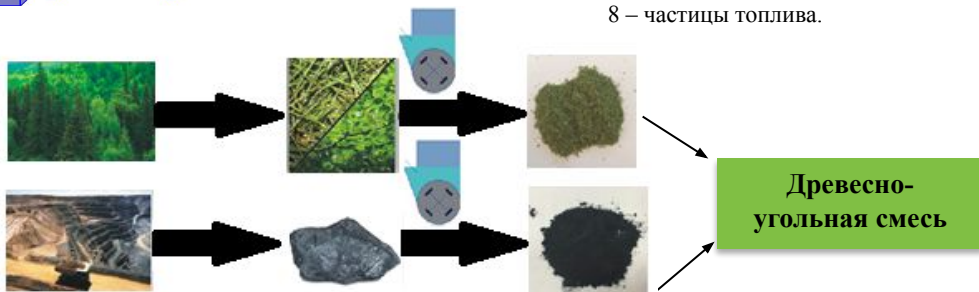
соответствующих по тепловым режимам топкам водогрейных котлов промышленной

Методика исследования характеристик и условия термической подготовки смесей измельченной древесины и угля в условиях, соответствующих топкам **водогрейных котлов**



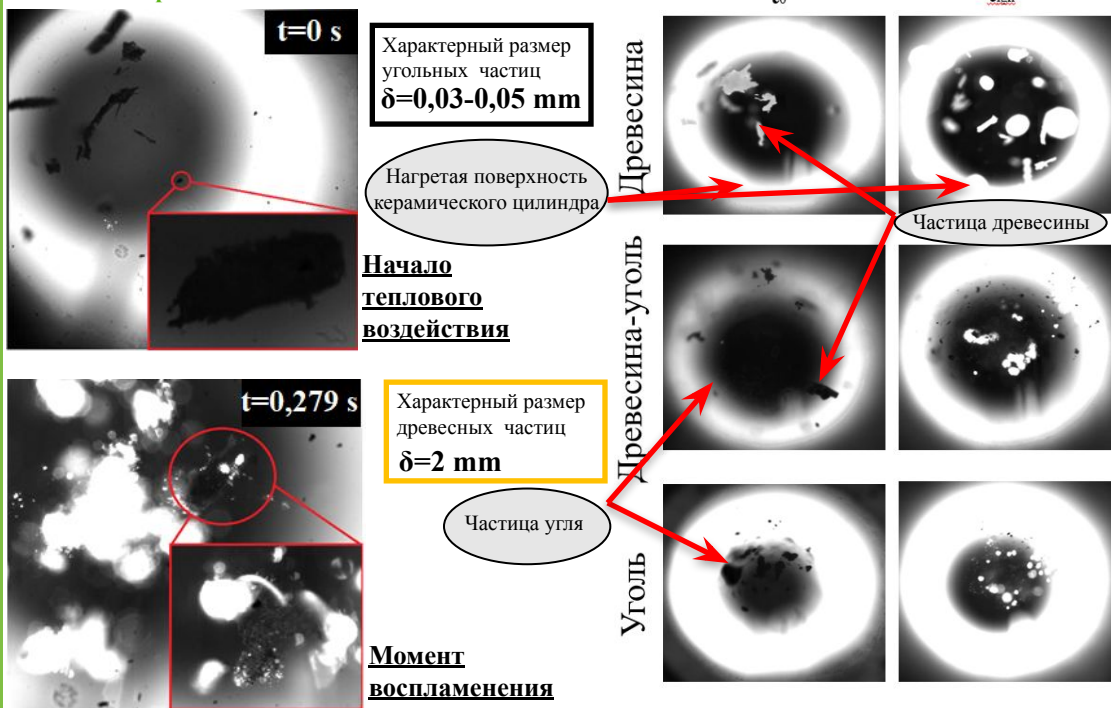
**Рисунок 1.** - Экспериментальный стенд по изучению процессов термической подготовки частиц угля и биомассы в условиях свободного падения в высокотемпературной среде [1]

- 1 – высокоскоростная видеокамера;
- 2 – распылитель частиц;
- 3- высокотемпературная печь;
- 4 - керамический полый цилиндр;
- 5– электрический нагреватель;
- 6 – терморегулятор,
- 7 - крепление высокоскоростной видеокамеры,
- 8 – частицы топлива.



**Рисунок 2.** - Схема приготовления древесно-угольных смесей

Термическая подготовка смесей измельченных древесины и угля в условиях, соответствующих топкам водогрейных котлов



**Рисунок 3.** - Кадры типичной видеозаписи процессов термической подготовки древесно-угольной смеси на основе березы при  $T=1073$  K [1]

## Исследовавшиеся материалы

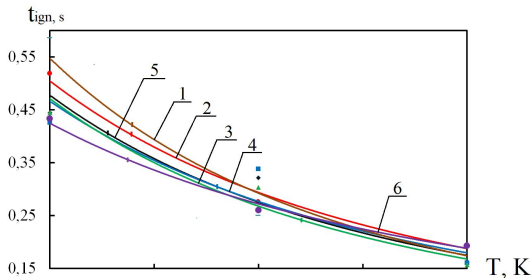
Номер состава	Уголь		Древесина	
	Марка	Содержание, %	Вид древесины	Содержание, %
№1	Д	60	Берёза	40
		70		30
		80		20
		90		10
№2	Д	60	Лиственница	40
		70		30
		80		20
		90		10
№3	Д	60	Сосна	40
		70		30
		80		20
		90		10

**Таблица 1.** Составы исследовавшихся древесно-угольных смесей [1]

# Первое защищаемое положение

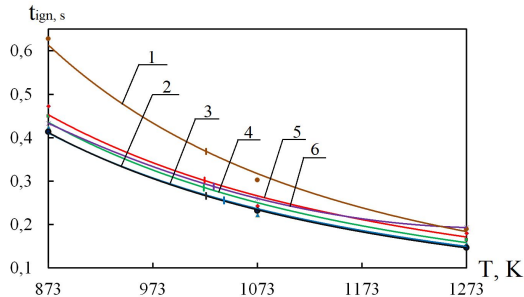
Добавление 40% мелкодисперсной древесной биомассы (с характерным размером древесных частиц до 2 мм) снижает период термической подготовки био-угольной смеси (с характерным размером угольных частиц до 0,05 мм) до 45% при относительно низких температурах топочной среды (до 873 К) по сравнению с однородным углем.

# Времена термической подготовки древесно-угольных смесей на основе трех видов древесины



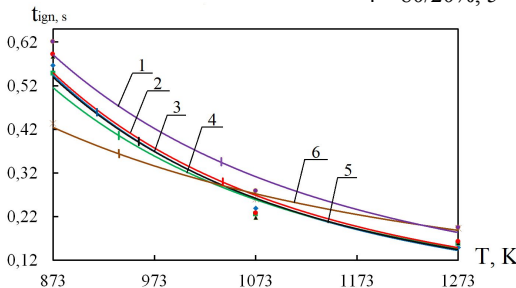
Смесь угля и опилок березы:

- 1- 100/0%, 2 – 60/40%, 3 – 70/30%, 4 – 80/20%,  
5 – 90/10%, 6 – 0/100%.



Смесь угля и опилок лиственницы:

- 1- 100/0%, 2 – 60/40%, 3 – 70/30%, 4 – 80/20%, 5 – 90/10%, 6 – 0/100%.

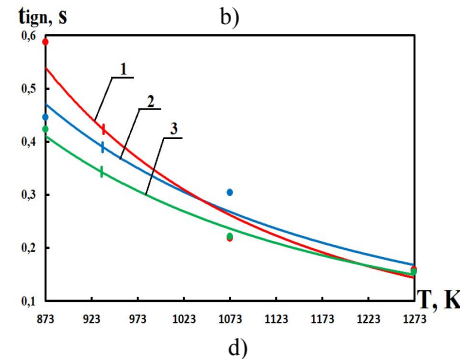
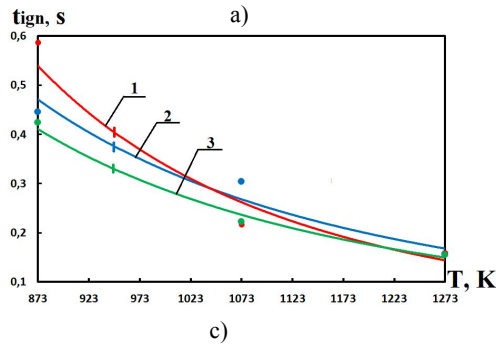
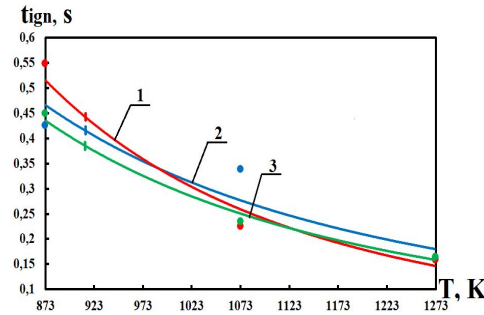
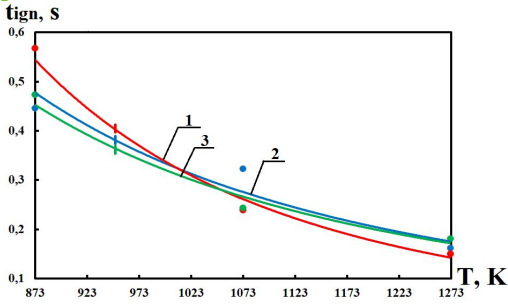


Смесь угля и опилок сосны:

- 1- 100/0%, 2 – 60/40%, 3 – 70/30%, 4 – 80/20%, 5 – 90/10%, 6 – 0/100%.

**Рисунок 4.** Зависимости времён термической подготовки древесно-угольной смеси от температуры внешней среды при разных концентрациях компонент топлива [1]

# Времена термической подготовки древесно-угольных смесей на основе трех видов древесины



**Рисунок 5.** Зависимости времён термической подготовки древесно-угольных смесей от температуры внешней среды (1 – сосна, 2 – береза, 3 – лиственница) при различных концентрациях компонентов в системе уголь/древесина: а) 90/10; б) 80/20; в) 70/30; д) 60/40 [1]



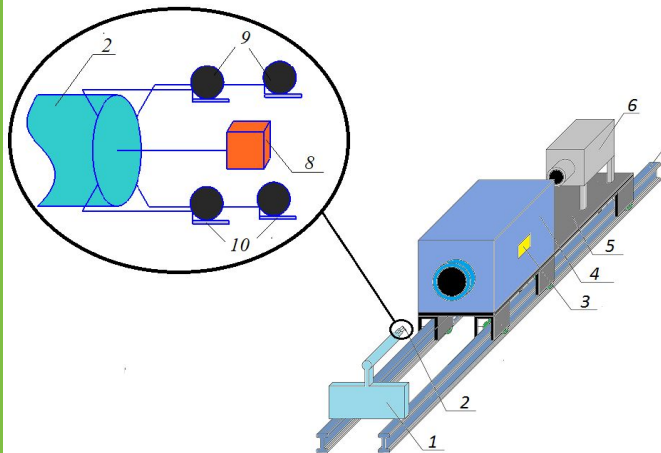


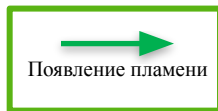
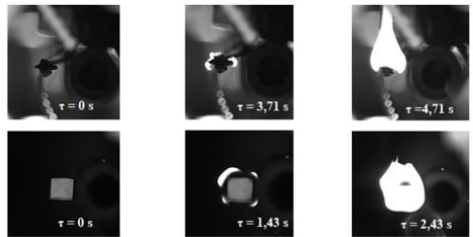
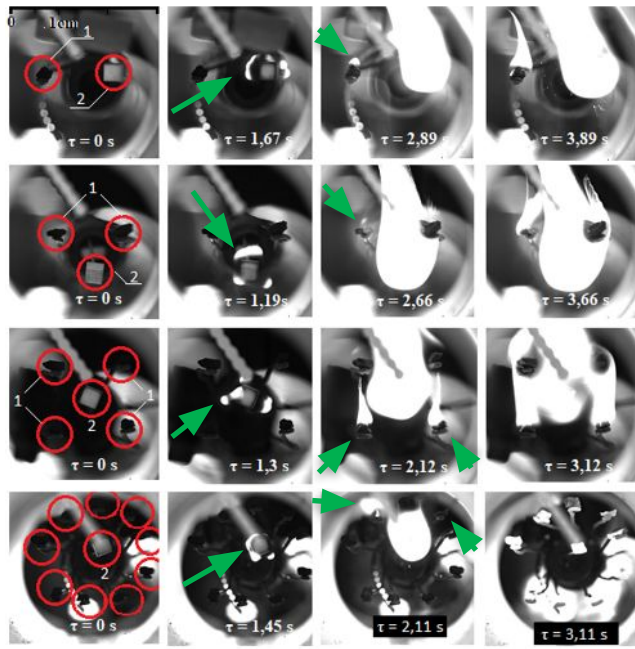
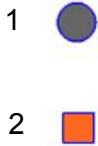
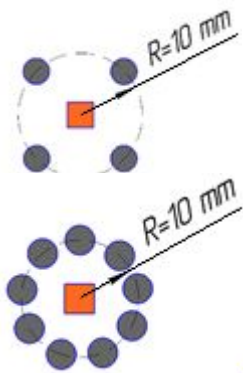
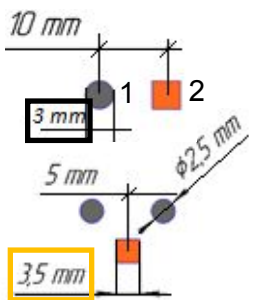
Рисунок 6. Экспериментальный стенд для изучения процессов термической подготовки частиц угля и биомассы в условиях высокотемпературного нагрева [1]

- 1 – подставка для держателя;
- 2 – металлический держатель;
- 3 – табло управления;
- 4 – высокотемпературная печь;
- 5 – передвижная платформа;
- 6 – высокоскоростная видеокамера;
- 7 – направляющая;
- 8 – частица древесины;
- 9 – частицы угля;
- 10 – держатель угольной частицы

Таблица 2. Теплофизические характеристики топлив.

Компонент	$C_p$	$\lambda$	$\rho$	$V^{daf}$	$C^r$	$Q_T$
	Дж/(кг·К)	Вт/(м·К)	кг/м <sup>3</sup>	%	%	Дж/кг
Длиннопламенный уголь (Д)	1150	0,116	1253	46	76	$26,2 \cdot 10^6$
Сосна	2300	0,14	500	85	49,6	$15,5 \cdot 10^6$

Обозначения:  $C_p$  – удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)],  $\lambda$  – теплопроводность [Вт/(м·К)],  $\rho$  – плотность [кг/м<sup>3</sup>],  $V^{daf}$  – выход летучих веществ [%],  $C^r$  – содержание углерода [%],  $Q_m$  – теплотворная способность [Дж/кг].

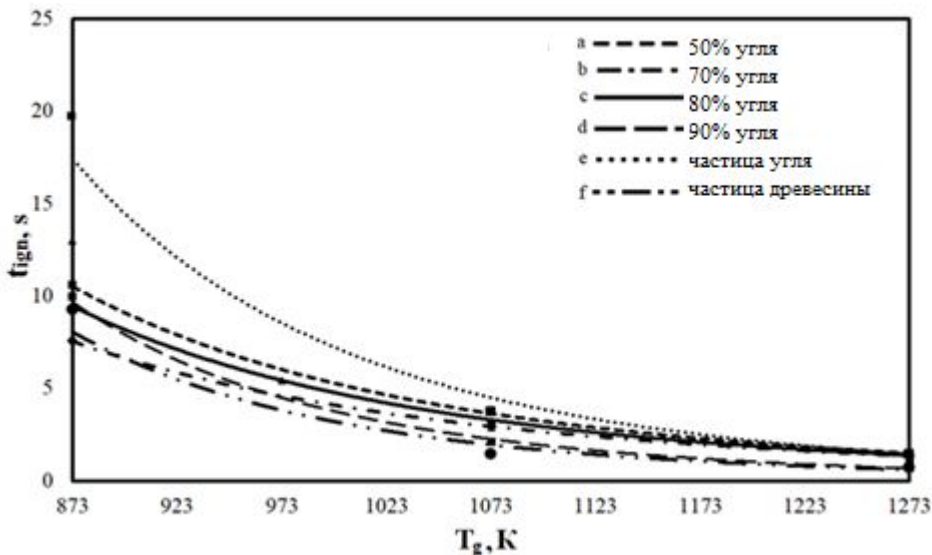


**Рисунок 7.**  
 Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины и угля при  $T_g = 1073 \text{ K}$   
 1 – частица угля;  
 2 – частица древесины.

# Второе защищаемое положение

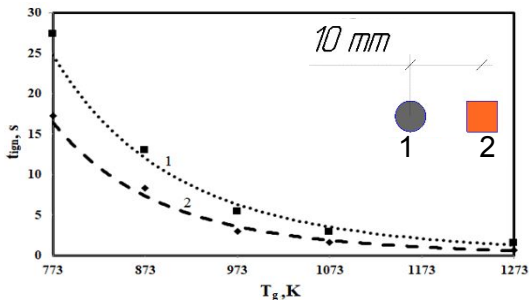
Минимальные времена термической подготовки угольных частиц зарегистрированы при температуре 873К для топливной смеси, концентрация угля в которой составляет 70-75%. Увеличение и снижение доли угля в смеси приводит к росту времени термической подготовки. При относительно высоких температурах (1073 – 1273К) времена термической подготовки от концентрации угля в смеси не зависят.

## Влияние концентрации и взаимного положения частиц древесины и угля на характеристики процесса термической подготовки смеси

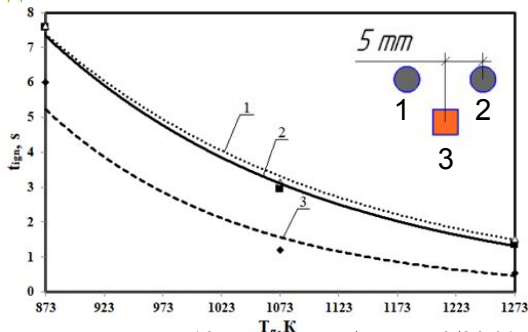


**Рисунок 8.** Времена термической подготовки в зависимости от температуры внешней среды при различной концентрации угля в смеси «уголь-древесина» [1]

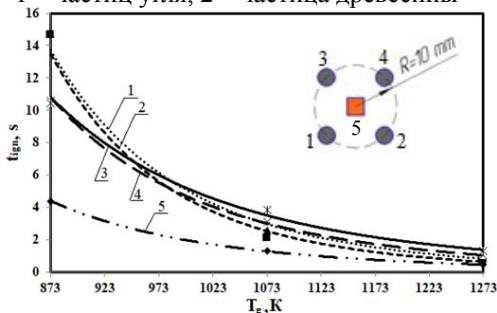
# Влияние концентрации и взаимного положения частиц древесины и угля на характеристики процесса термической подготовки смеси



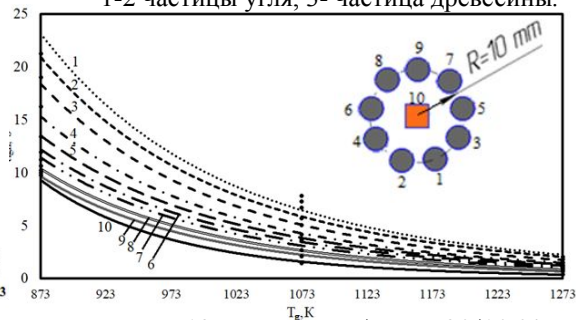
**Рисунок 9.** Древесина/уголь 50/50 %  
1 – частиц угля, 2 – частица древесины



**Рисунок 10.** Древесина/уголь 70/30 %  
1-2 частицы угля, 3- частица древесины.

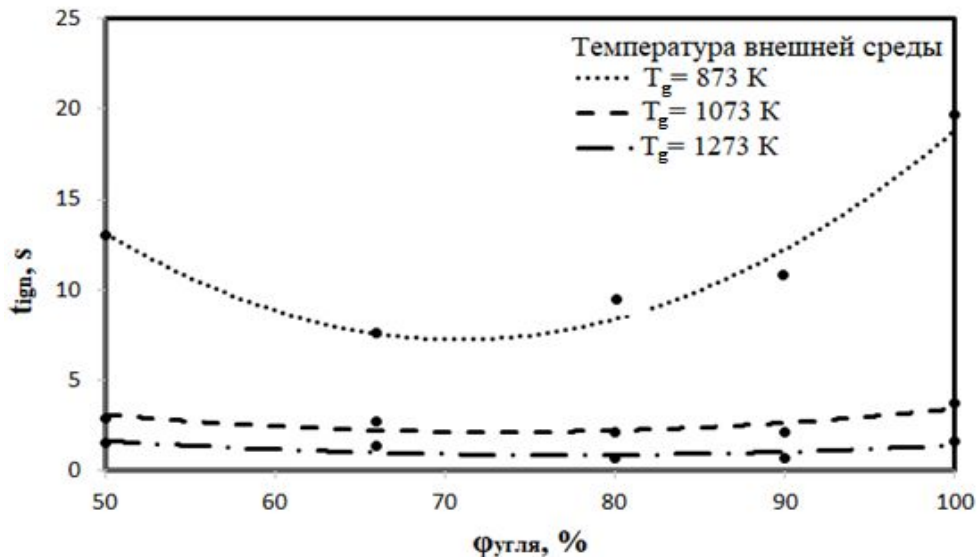


**Рисунок 11.** Древесина/уголь 80/20 %  
1-4 частицы угля, 5- частица древесины



**Рисунок 12.** Древесина/уголь 90/10 %  
1-9 частицы угля, 10- частица древесины

## Влияние концентрации и взаимного положения частиц древесины и угля на характеристики процесса термической подготовки смеси



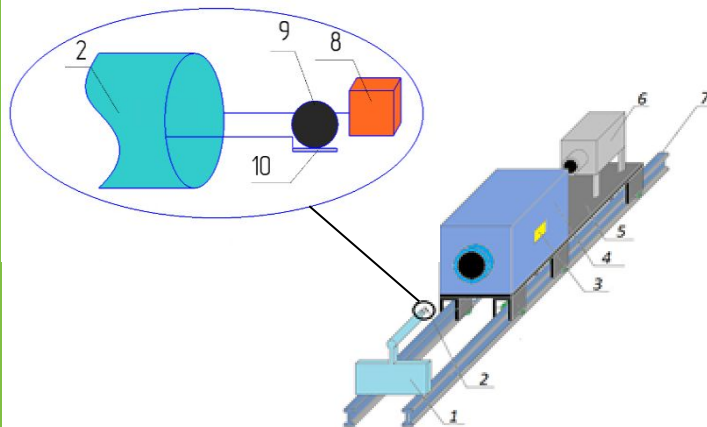
**Рисунок 13.** Времена термической подготовки частицы угля в зависимости от концентрации угольного топлива в системе «уголь-древесина»

[1] 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

# Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместной термической подготовки

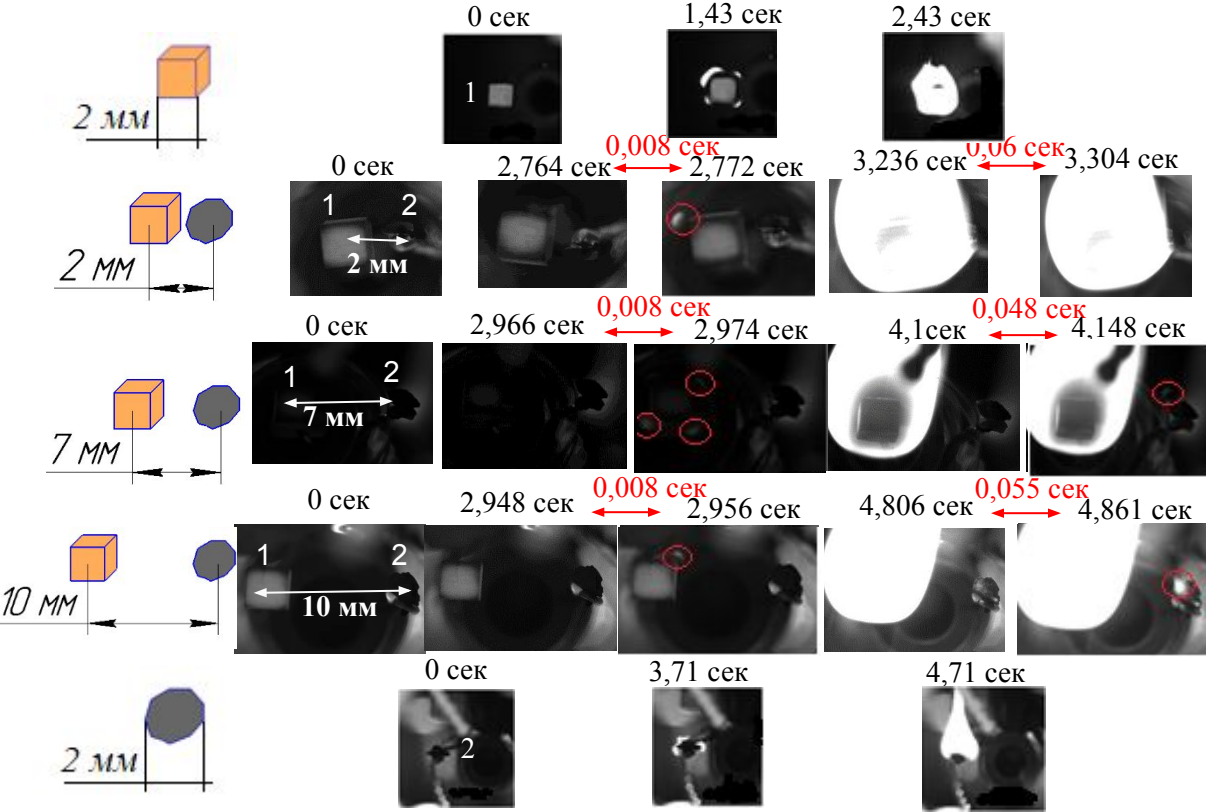
**Рисунок 14.**

Экспериментальный стенд для изучения процессов термической подготовки частиц угля и биомассы в условиях высокотемпературного нагрева [1]



- 1 – подставка для держателя;
- 2 – металлический держатель;
- 3 – табло управления;
- 4 – высокотемпературная печь;
- 5 – передвижная платформа;
- 6 – высокоскоростная видеокамера;
- 7 – направляющая;
- 8 – частица древесины;
- 9 – частица длиннопламенного угля;
- 10 – держатель частицы угля.

[1] S.V. Syrodoy , G.V. Kuznetsov , Zh.A. Kostoreva, D.Yu. Malyshev, N.Y.Gutareva, The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating. Journal of the Energy Institute, **97**, 2021, 13-26



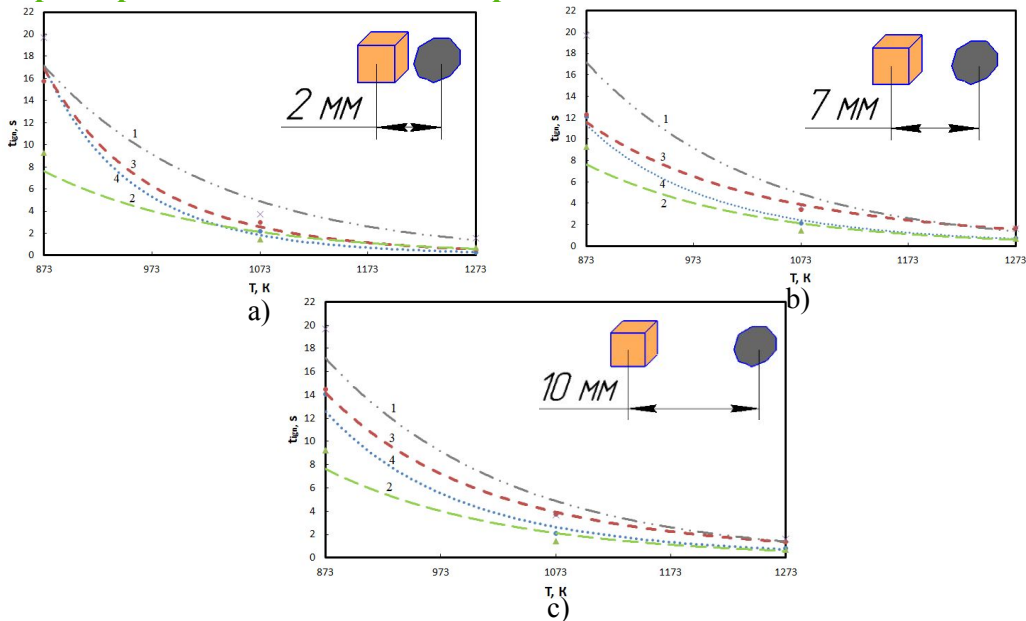
**Рисунок 15.** Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины и угля при  $T_g = 1073 \text{ K}$   
 1 – частица древесины; 2 – частица угля.



## Третье защищаемое положение

При массовом соотношении в топливной смеси 50/50 древесина/уголь времена термической подготовки частицы угля снижаются на 30-40% (по сравнению с однородным углем) при температуре окружающей среды 873К.

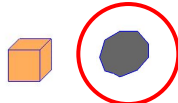
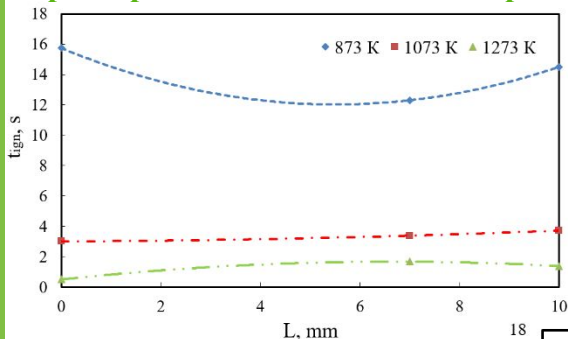
# Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместной термической подготовки



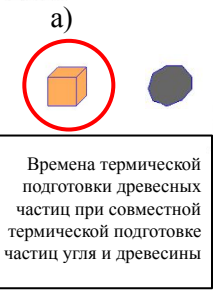
**Рисунок 16.** Зависимости времён термической подготовки частиц угля и древесной биомассы от температуры окружающей среды при различных вариантах расположения частиц: а) расстояние 2 мм; б) расстояние 7 мм; в) расстояние 10 мм, где:

1 - одна частица угля, 2 - одна частицы древесины, 3 - частица угля при совместной термической подготовке древесина/уголь, 4 - частицы древесины при совместной термической подготовке древесина/уголь

# Влияние расстояния между частицами древесины и угля на характеристики их совместной термической подготовки



Времена термической подготовки загорания угольных частиц при совместной термической подготовке частиц угля и древесины



Времена термической подготовки древесных частиц при совместной термической подготовке частиц угля и древесины

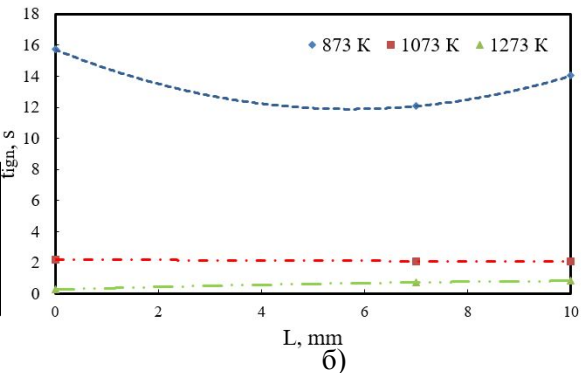
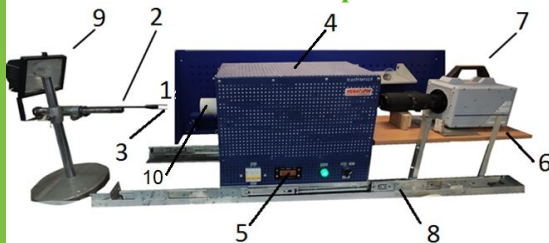


Рисунок 17. Зависимости времён термической подготовки частицы угля (а) и древесины (б) от среднего расстояния между ними при разных температурах окружающей среды.[1]

# Четвертое защищаемое положение

Изменение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45% приводит к росту времени термической подготовки для частиц **осины** почти **в 11 раз** (с 17,7 до 186,6 секунд), а для частиц **сосны** почти **в 14 раз** (с 19 до 261 секунд) при температуре окружающей среды 1273 К.

# Влияние влажности на эффективность использования древесины как компоненты топлива в промышленной теплоэнергетике



**Рисунок. 18.** Зависимости времен термической подготовки древесных частиц от температуры внешней среды:

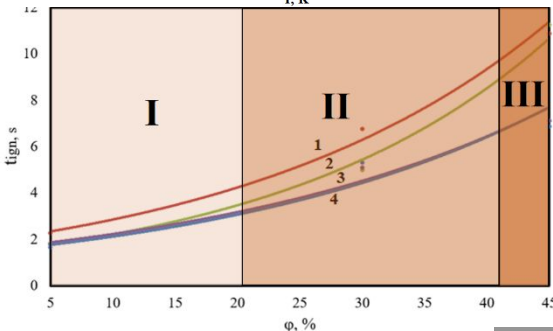
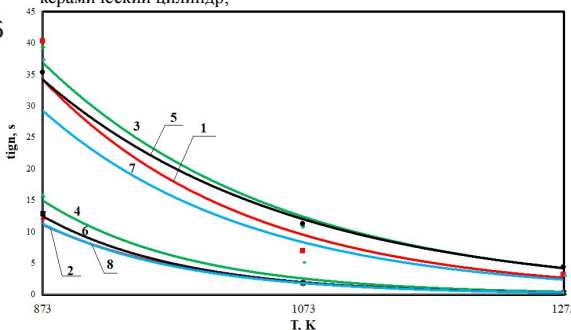
1 – насыщенная влагой частица кедра; 2 – сухая частица кедра; 3 – насыщенная влагой частица лиственницы; 4 – сухая частица лиственницы; 5 – насыщенная влагой частица сосны; 6 – сухая частица сосны; 7 – насыщенная влагой частица осины; 8 – сухая частица осины. [1]

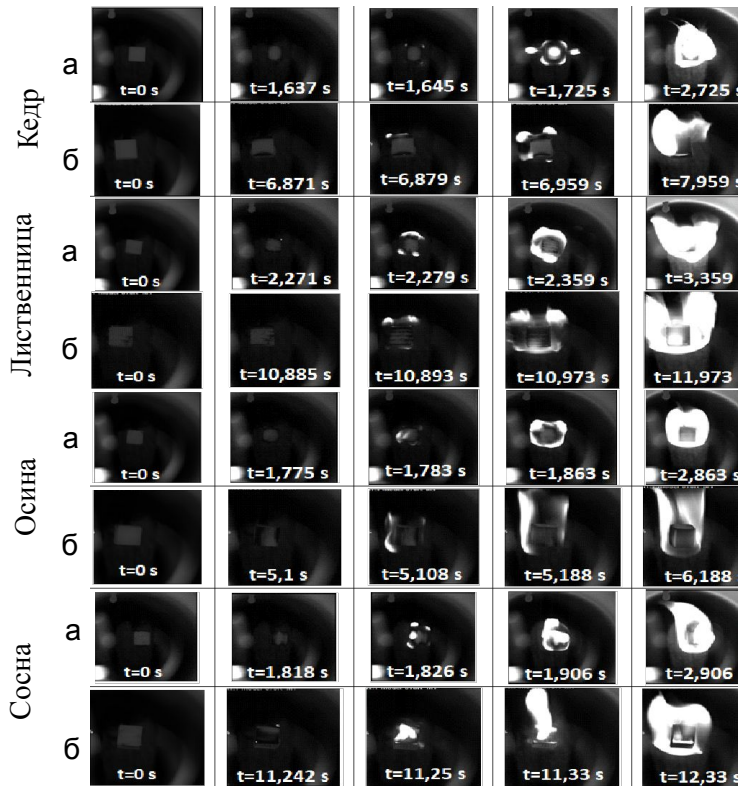
**Рисунок. 19.** Зависимость времен термической подготовки древесных частиц от их относительной влажности  $\phi$  при температуре внешней среды  $T=1073\text{K}$ :

1 – лиственница; 2 – сосна; 3 – осина; 4 – кедр;

I – влажность после камерной сушки, II – воздушно-сухая III – свежесрубленная [1]

**Рисунок 20.** Схема экспериментальной установки  
1 – частица древесины; 2 – держатель частицы; 3 – металлическая игла; 4 – высокотемпературная печь; 5 – экран; 6 – подвижная площадка; 7 – высокоскоростная видео камера; 8 – платформа для передвижения подвижной площадки; 9 – прожектор; 10 – керамический цилиндр;

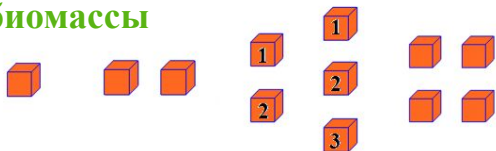




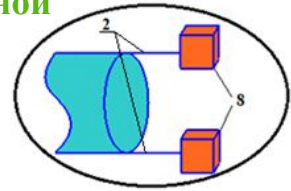
Характерный  
размер частиц  
 $\delta=5 \text{ mm}$

**Рисунок 21.** Типичные кадры процесса термической подготовки частицы древесины при  $T=1073\text{K}$ : а – сухая частица; б – насыщенная влагой частиц

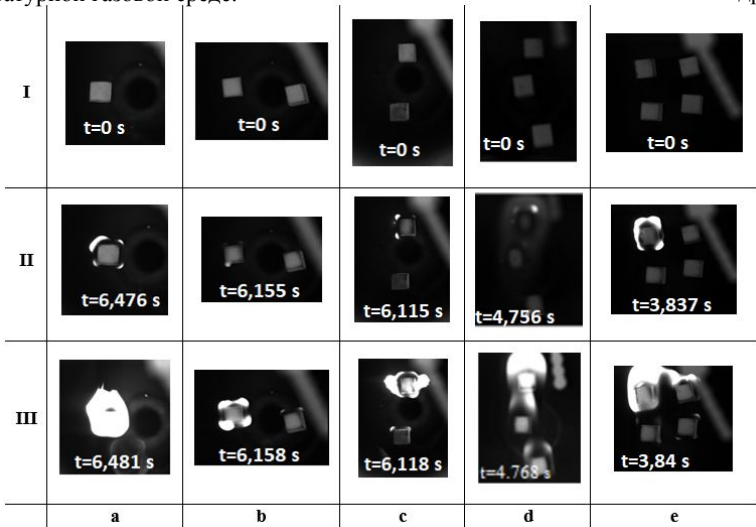
# Термическая подготовка группы частиц древесной биомассы



**Рисунок 22.** Схемы расположения нескольких (двух, трех, четырёх) частиц в высокотемпературной газовой среде.



**Рисунок 24.** Держатель древесных частиц



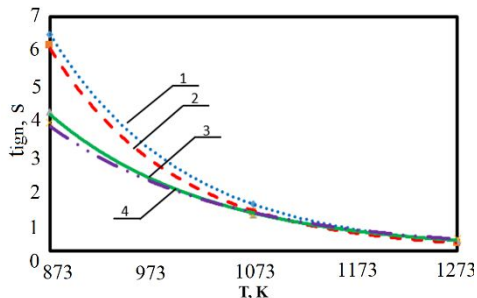
**Рисунок 23.** Типичные кадры процесса термической подготовки частиц древесины при  $T_0=873$  К [1]

# Пятое защищаемое положение

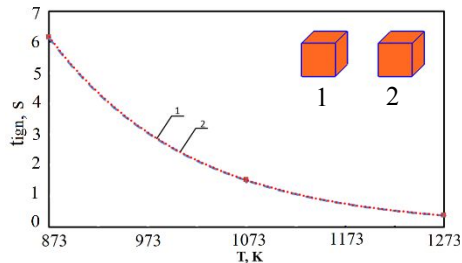
Период термической подготовки любой совокупности частиц древесины происходит интенсивнее аналогичных процессов одиночной частицы в идентичных условиях.



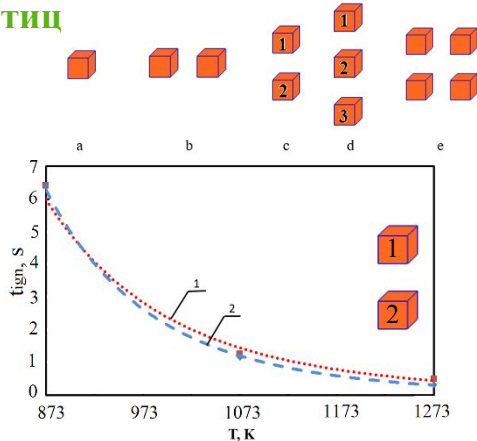
# Термическая подготовка группы частиц древесной биомассы



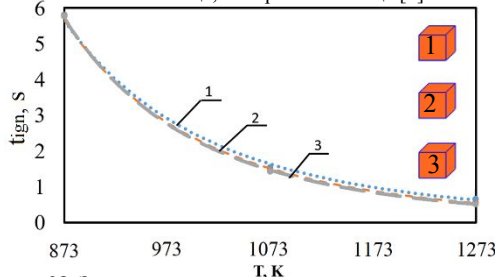
**Рисунок 25.** Зависимости времен термической подготовки частиц древесины от температуры внешней среды при разном числе частиц в группе:  
1 – одна (a), 2 – две (c), 3 – три (d), 4 – четыре (3h) [1]



**Рисунок 27.** Зависимости времен термической подготовки древесины от температуры внешней среды (b):  
1 – левая частица, 2 – правая частица [1]



**Рисунок 26.** Зависимости времен термической подготовки двух частиц древесины от температуры внешней среды (c):  
1 – нижняя частица, 2 – верхняя частица [1]



**Рисунок 28.** Зависимости времен термической подготовки трех частиц древесины от температуры внешней среды (d).  
1 – нижняя, 2 – средняя, 3 – верхняя [1]

## Оценка экономического эффекта древесных опилок совместно с углем (сбережение энергетических и материальных ресурсов)

По оценкам специалистов в сутки на территории Томска на предприятиях лесопиления после ленточного распила образуется около 300 м<sup>3</sup> не сортированных (сосна, лиственница, береза, кедр) опилок. Средняя насыпная плотность древесных опилок колеблется в пределах 120-200 кг/м<sup>3</sup> для сухих (8-15% влажности) и 320-580 кг/м<sup>3</sup> для влажных (более 15% влажности) опилок.

Выполнен расчет объема  $V_{\text{био}}$  отходов лесопиления 68 предприятий г. Томска за 2021 год :

$$V_{\text{био}} = 300 \cdot 365 = 109500 \text{ м}^3$$

Масса этих отходов:

$$M_{\text{био}} = V_{\text{био}} \cdot \rho_{\text{био}} = 109500 \cdot 300 = 32850000 \text{ кг} = \mathbf{32850 \text{ т/год}}$$

На территории г. Томска к началу 2022 году работает 18 угольных котлов малой мощности марки НР-18 и два котла марки «Сибирь» [1]

Расход угля по нормативам удельного расхода условного топлива на отпущенную тепловую энергию кг.уг./Гкал всех котлов малой мощности в год составляет:

$$1) D_{\text{coal1}} = 365 \cdot 24 \cdot 226,9 \cdot 1,28 = 2544 \text{ 184 кг/год}$$

$$2) D_{\text{coal2}} = 365 \cdot 24 \cdot 230 \cdot 1,28 = 2578 \text{ 944 кг/год}$$

$$3) D_{\text{coal3}} = 365 \cdot 24 \cdot 229 \cdot 1,28 = 2567 \text{ 731 кг/год}$$

$$4) D_{\text{coal4}} = 365 \cdot 24 \cdot 232,7 \cdot 1,28 = 2609 \text{ 218 кг/год}$$

$$5) D_{\text{coal5}} = 365 \cdot 24 \cdot 225,7 \cdot 1,92 = 3796 \text{ 093 кг/год}$$

$$6) D_{\text{coal6}} = 365 \cdot 24 \cdot 234,4 \cdot 1,28 = 2628 \text{ 280 кг/год}$$

$$7) D_{\text{coal789}} = 365 \cdot 24 \cdot 159,6 \cdot 1,98 = 2768 \text{ 230 кг/год}$$

В сумме это:  $D_{\text{coal}} = \mathbf{19463 \text{ т/год}}$

Объем древесной биомассы на год для всех угольных котлов малой мощности г. Томска при условии замены 20% от общего расхода угля:

$$D_{\text{био}} = 19463 \cdot 0,2 = 3892,6 \text{ т/год}$$

**Нужно отметить, что реальное количество отходов предприятий лесопиления превышает требуемого на все котлы марки НР-18 в 8,5 раз.**

Цена на внутреннем рынке РФ в зависимости от марки угля (фракции 5-20 мм) и удаленности от угледобывающих предприятий варьируется от 3200 до 6650 руб./т. [2]. Пример, цена каменного угля марки Д (фракции 5-20 мм) в г. Кемерово компании ООО «КемУглеСбыт» составляет 4500 руб./т. Следовательно, экономия на всех котельных за отопительный период:

$$S = 3892,6 \cdot 4500 = 17516700 \text{ руб./год} = \mathbf{17,5 \text{ млн руб./год}}$$

## Оценка экономического эффекта сжигания древесины совместно с углем (сбережение энергетических и материальных ресурсов)

Но существенно более значимый эффект может быть достигнут при замене части угля на отходы лесопиления на ТЭЦ филиала АО «ОТЭК» в г. Северске. В состав ТЭЦ входит 4 котла типа ТП-230.

Расход топлива (уголь) в кг/ч котла ТП-230, при плотности каменного угля  $\rho=1500$  кг/м<sup>3</sup>:

$$D_{\text{coal}}=1100 \cdot 132=198000 \text{ кг/ч}=198 \text{ т/ч}$$

Расход топлива (уголь) в кг/ч для 4 котлов ТП-230:

$$D_0=198 \cdot 4=792 \text{ т/ч}$$

Расход топлива (уголь) в кг/ч для 4 котлов ТП-230 в календарный год:

$$D=792 \cdot 365=289080 \text{ т/год}$$

Объем древесной биомассы на год для 4 паровых котлов ТЭЦ филиала АО «ОТЭК» в г. Северске при условии замены 10% от общего расхода угля:

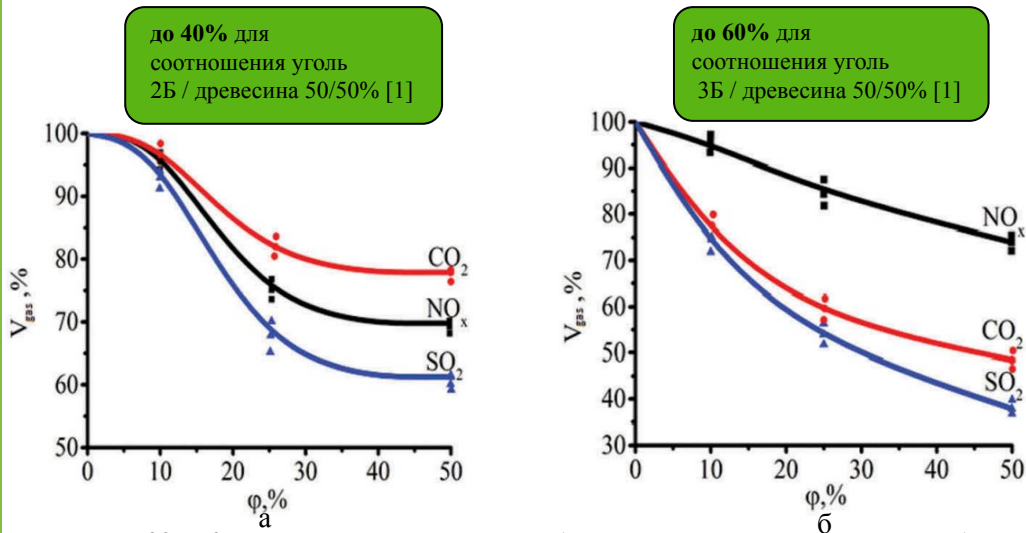
$$D_{\text{bio}}=289080 \cdot 0,1=28908 \text{ т/год}$$

Экономия за отопительный период:

$$S=2300 \cdot 28908=66488400 \text{ руб./год}=66,5 \text{ млн руб./год}$$

**Такой экономический эффект может быть достигнут с минимальными изменениями технологии сжигания топлива. Возможны разные варианты. Самый простой - при подаче угля в систему распыления топлива подмешивается 10% опилок, прошедших определенную сортировку.**

При совместном сжигании угля и биомассы снижаются выбросы антропогенных оксидов  $\text{NO}_x$  и  $\text{SO}_x$



**Рисунок 29.** Концентрации основных выбрасываемых антропогенных выбросов при термическом разложении смешанные виды топлива на основе:(а) уголь 2Б, (б) уголь 3Б; ( $\phi$  - доля древесины (сосна) в топливе) [1]

[1] 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, Volume 191, Issue 11, 2019, Pages 2071-2081.

Оценка возможности снижение выхода твёрдых отходов при совместном сжигании угля с древесиной

Соотношение древесина/уголь, %	Марка угля	Теплота сгорания, МДж/кг	Влажность, % (по массе)	Зольность, % (по массе)	Выход летучих, % (по массе)
100/0	-	21.73	6.96	0.29	80.25
0/100	Д	26.20	5.83	15.76	12.36
10/90	Д	24.92	5.42	14.00	14.55
25/75	Д	24.31	5.23	11.91	38.89
50/50	Д	23.84	5.35	10.44	40.96
0/100	Т	25.72	5.52	18.37	25.56
10/90	Т	25.60	5.42	14.24	26.46
25/75	Т	25.22	5.34	13.65	28.33
50/50	Т	24.79	5.41	11.08	39.95

Таблица 3. Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ [1]

Добавление биомассы в котел, работающий на угле, оказывает лишь незначительное влияние на общий КПД электростанции, в основном зависящий от содержания влаги в биомассе [2].

## Преимущества совместного сжигания угля с биомассой заключается в следующем:

1. Уже при концентрации биомассы **15-20%** в древесно-угольной смеси **существенно (до 40%) снижается содержание оксидов серы и азота** в дымовых газах [1].
2. Увеличение концентрации древесины в древесно-угольной смеси до **50%** **снижает зольность** смеси до **10,44%** для длиннопламенного угля (**15,76%**) и до **11,08%** для тощего угля (**18,37%**) [2].
3. **Добавление 50%** древесной биомассы (сосны) в качестве компоненты топлива к тощему углю **снижает удельную теплоту сгорания** топлива **всего на 9,1%** по сравнению с однородным углем [3].



[1] 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, Volume 191, Issue 11, 2019, Pages 2071-2081

[2] Кузнецов Г.В., Янковский С.А. *Условия и характеристики зажигания композиционных топлив на основе угля с добавлением древесины*, Теплоэнергетика, 2, 2019, 70-75 .

[3] Янковский С.А., Кузнецов Г.В. *Особенности физико-химических превращений смесевых топлив на основе типичных каменных углей и древесины при нагреве*, Химия твердого топлива, 1, 2019, 26-33.

Совместное сжигание угля с древесной обеспечивает возможность снижения радиоактивности золы угольных ТЭС и котельных (снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду) предприятий промышленной теплоэнергетики

По данным [1], выбросы газообразных радиоактивных изотопов  $^{220}\text{Rn}$  и  $^{222}\text{Rn}$ , не улавливаемых действующими системами очистки ТЭС, составляют около  $6 \cdot 10^{10}$  Бк/ГВт (эл) год

Химический загрязнитель	Концентрация выбросов, отн.ед.	
	ТЭС	АЭС
$\text{SO}_2$	$1.18 \cdot 10^{-3}$	$1.68 \cdot 10^{-7}$
Твердые частицы	$3.33 \cdot 10^{-4}$	$2.08 \cdot 10^{-8}$
$\text{NO}_x$	$1.28 \cdot 10^{-4}$	$1.92 \cdot 10^{-8}$
$\text{CO}_2$	$1.09 \cdot 10^{-5}$	$1.82 \cdot 10^{-8}$

**Таблица 4.** Результаты экспериментальных исследований по определению теплоты сгорания, влажности, зольности и выхода летучих веществ [2]

**Радиоактивный фон угольных ТЭС в  
5-10 раз выше, чем для АЭС [3]**



# Рекомендации по практическому использованию результатов диссертации

1. При выборе режимов и условий сжигания древесно-угольных смесей в топках водогрейных котлов необходимо учитывать, что время термической подготовки (индукционный период) большой совокупности частиц смеси в несколько раз (2-3) меньше аналогичных времён для одиночной частицы.
2. В связи с тем, что вид древесины не влияет на условия и характеристики процесса термической подготовки древесно-угольной смеси к сжиганию в топках водогрейных котлов, при выборе условий сжигания древесной компоненты древесно-угольных смесей можно использовать экспериментальные данные по любому из реально возможных вариантов видов древесины.
3. Вследствие того, что влажность древесины влияет существенно условия и характеристики процессов термической подготовки древесно-угольных смесей к сжиганию, влажность древесины необходимо контролировать и обеспечивать возможность регулирования влажности древесно-угольных смесей перед их сжиганием.
4. При подготовке древесной компоненты к сжиганию нет необходимости дополнительного измельчения частиц древесины с начальным характерным размером до трех миллиметров.
5. Сжигание древесно-угольных смесей в топках водогрейных котлов возможно без реконструкции топок последних.



# Основные результаты и выводы

1. По результатам впервые проведенных экспериментальных исследований процессов термической подготовки частиц типичных углей и древесины в смеси установлены основные закономерности исследовавшихся процессов (условия, механизмы и характеристики термической подготовки смеси частиц угля и древесины).
2. Разработана методика экспериментального исследования процессов термической подготовки счетного количества частиц угля и древесины в смеси.
3. Разработаны методики экспериментального исследования влияния концентрации биомассы в древесно-угольных смесях на время термической подготовки.
4. Впервые экспериментально установлено влияние концентрации биомассы (от 10% до 50%) в древесно-угольных смесях на время термической подготовки последних.
5. Добавление 40% мелкодисперсной древесной биомассы (с характерным размером древесных частиц до 2 мм) снижает период термической подготовки био-угольной смеси (с характерным размером угольных частиц до 0,05 мм) до 45% при относительно низких температурах топочной среды (до 873 К) по сравнению с однородным углем.
6. Установлено перспективное соотношение концентраций компонент в системе уголь/древесина - 70/30 (по критерию минимизации времени термической подготовки).
7. При массовом соотношении в топливной смеси 50/50 древесина/уголь времена термической подготовки частицы угля снижаются на 30-40% (по сравнению с однородным углем).
8. Минимальные времена термической подготовки угольных частиц зарегистрированы при температуре 873 К для топливной смеси, концентрация угля в которой составляет 70-75%. Увеличение и снижение доли угля в смеси приводит к росту времени термической подготовки. При относительно высоких температурах (1073 – 1273 К) времена термической подготовки от концентрации угля в смеси не зависят.

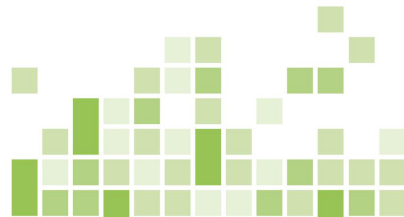
# Основные результаты и выводы

9. Вид древесной биомассы оказывает незначительное влияние на характеристики термической подготовки древесно-угольной смеси.
10. Изменение влажности древесины в диапазоне от 10 до 45% приводит к росту времени термической подготовки для частиц осины почти в 11 раз (с 17,7 до 186,6 секунд), а для частиц сосны почти в 14 раз (с 19 до 261 секунд) при температуре окружающей среды 1273 К.
11. Период термической подготовки любой совокупности частиц древесины происходит интенсивнее аналогичных процессов одиночной частицы в идентичных условиях.
12. Обоснована возможность эффективного сжигания древесно-угольных смесей в топочных условиях водогрейных котлов промышленной теплоэнергетики.

**СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ!**



ТОМСКИЙ  
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ



Диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

# ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДРЕВЕСНО-УГОЛЬНЫХ СМЕСЕЙ В КАЧЕСТВЕ ТОПЛИВА КОТЕЛЬНЫХ АГРЕГАТОВ

05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

Соискатель: **Косторева Ж. А.**

Научный руководитель: **д.ф.-м.н., профессор Кузнецов Г. В.**

Томск 2022

# Публикации:

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

1. **Kostoreva, J. A.** Ignition of wood and coal particle mixtures in conditions of steam and water boiler furnaces / S.V. Syrodoy, J.A. Kostoreva, A.A. Kostoreva, L.I.Asadullina // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – p. 443-449.
2. **Kostoreva, Zh. A.** Effect of concentration and relative position of wood and coal particles on the characteristics of the mixture ignition process / G. V. Kuznetsov, S. V. Syrodoy, A. A. Kostoreva, Zh. A. Kostoreva, N.A.Nigay // Fuel. – 2020. – V. 274. – p. 117843.
3. **Kostoreva, Zh. A.** Characteristics and conditions for ignition of bio-coal mixtures based on coal and forest combustible material / S.V. Syrodoy, G. V. Kuznetsov, N. Y. Gutareva, Zh. A. Kostoreva, A. A. Kostoreva, N. A. Nigay // Journal of the Energy Institute. – 2020. – V. 93. – p. 1978-1992.
4. **Kostoreva, Zh. A.** Ignition of a group of the woody biomass particles / S. V. Syrodoy , G. V. Kuznetsov , Zh. A. Kostoreva, I. K. Zabrodina , D. Yu. Malyshev // Thermal Science and Engineering Progress. – 2021. – V. 25. - p. 101017.
5. **Kostoreva, Zh. A.** The effect of the distance between wood and coal particles on the characteristics of their joint ignition under conditions of high-temperature radiation-convective heating / S. V. Syrodoy, G. V. Kuznetsov, Zh. A. Kostoreva, D. Yu. Malyshev, N. Y. Gutareva // Journal of the Energy Institute. – 2021. – V. 97. – p. 13-26.

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

1. **Kostoreva, Z. A.** Definition of wet wood particles ignition conditions and characteristics to increase the resource efficiency of heat power engineering / Z. A. Kostoreva, D. Yu. Malyshev, S. V. Syrodoy // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University, Geo Assets Engineering. – 2021. – V.332. – p. 97-105.

# Апробация работы:

1. Всероссийская конференция с элементами научной школы для молодых ученых «XXXV Сибирский теплофизический семинар», посвященная 75 – летию заслуженного деятеля науки РФ Терехова Виктора Ивановича (Новосибирск, 2019);
2. XVI Всероссийская школа-конференция молодых ученых с международным участием “Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики” (Новосибирск, 2020);
3. XI Всероссийская конференция с международным участием «Горение топлива: теория, эксперимент, приложения» (Новосибирск, 2021);
4. XII Семинар вузов по теплофизике и энергетике (Сочи, 2021);
5. VIII Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических» (Томск, 2019);
6. IX Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2020);
7. X Всероссийская научная конференция с международным участием «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2021);
8. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2019);
9. Международная молодежная научная конференция «Тепломассоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2021);
10. I Всероссийская с международным участием молодежная конференция «Бутаковские чтения» (Томск, 2021).

## 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». 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».
2. Государственных заданий: Гос. задания "Наука" проект № FSWW-2020-0022. Гос. задания "Наука" проект № 8.13264.2018/8.9

# Паспорт специальности

## 05.14.04 Промышленная теплоэнергетика

### Формула специальности:

Научная специальность, объединяющая исследования по совершенствованию промышленных теплоэнергетических систем, по разработке и созданию нового и наиболее совершенного теплотехнического и теплового технологического оборудования. В рамках специальности ведется поиск структур и принципов действия теплотехнического оборудования, которые обеспечивают **сбережение энергетических ресурсов, уменьшение энергетических затрат на единицу продукции**, сбережение материальных ресурсов, направляемых на изготовление теплопередающего и теплоиспользующего оборудования, **защиту окружающей среды**.

### Области исследования:

1. Разработка научных основ сбережения энергетических ресурсов в промышленных теплоэнергетических устройствах и использующих тепло системах и установках.

Оптимизация схем энергетических установок и систем для генерации и трансформации энергоносителей, основанных на принципах их комбинированного производства.

Теоретические и экспериментальные исследования процессов тепло- и массопереноса в тепловых системах и установках, использующих тепло. Совершенствование методов расчета тепловых сетей и установок с целью улучшения их технико-экономических характеристик, экономии энергетических ресурсов.

Разработка новых конструкций теплопередающих и теплоиспользующих установок, обладающих улучшенными эксплуатационными и технико-экономическими характеристиками.

Оптимизация параметров тепловых технологических процессов и разработка оптимальных схем установок, использующих тепло, с целью экономии энергетических ресурсов и улучшения качества продукции в технологических процессах.

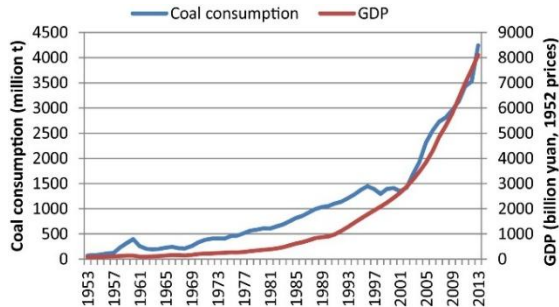
Разработка и совершенствование аппаратов, использующих тепло, и создание оптимальных тепловых систем для защиты окружающей среды.

Разработка теоретических аспектов и методов интенсивного энергосбережения в тепловых технологических системах.

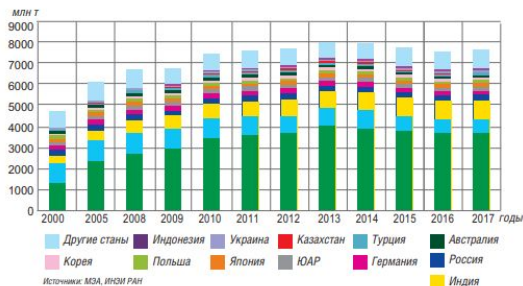
Разработка теоретических основ создания малоотходных и безотходных тепловых технологических установок.



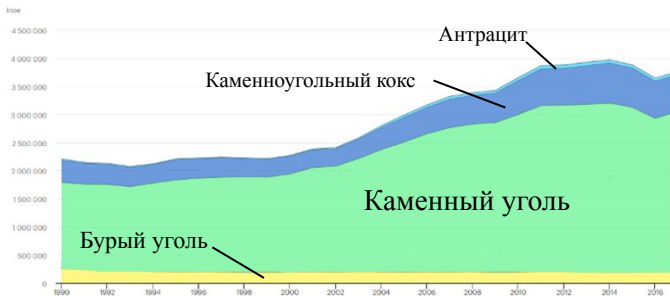
# Динамика использования угля



Динамика потребления угля и роста ВВП в Китае с 1953 по 2013 год [1]



Потребление всего угля в основных странах мира в период с 2000 по 2017 г. [3]



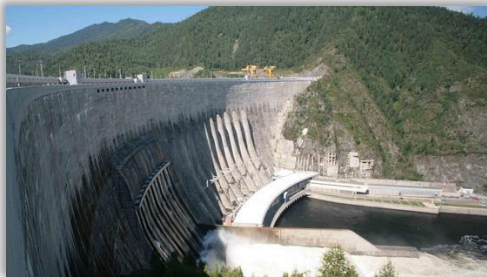
Добыча угля по типу в Мире 1990-2017 [2]

[1] Jing Xu, Min Zhou, Hailong Li. The drag effect of coal consumption on economic growth in China. during 1953–2013. Resources, Conservation and Recycling. 129 (2018) 326–332.

[2]. Coal Information 2000-2018 // International Energy Agency Statistics, OECD/IEA, 2018

[3] Кондратьев В.Б. Глобальный рынок угля. М.: Горная промышленность.– 2017. – №2. – с. 17-23

# Нетрадиционные источники энергии



**ГЭС**

- Гидроэнергетический потенциал всех полноводных рек на настоящее время практически исчерпан себя
- Выбросы парниковых газов [1]



**АЭС**

- Тепловое загрязнение окружающей среды;
- Утечка радиоактивности (радиоактивные выбросы и сбросы);
- Транспортировка радиоактивных отходов;
- Тяжелые последствия аварий [2].



**Солнечные панели**

- Высокая стоимость
- Нестабильность (ночное время, пасмурные и дождливые дни)
- Высокая стоимость накопленной энергии [3]



- Неустойчивость (непостоянство и нерегулируемость ветрового потока);
- Высокая стоимость;
- Опасность для дикой природы;
- Шумовое загрязнение [4]

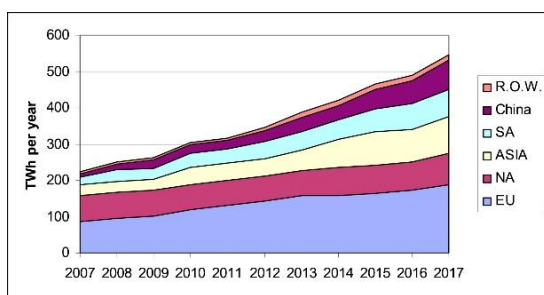
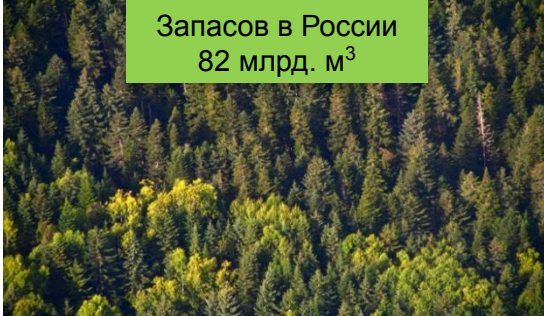
[1] Anabela Botelho, Paula Ferreira, Fátima Lima, Ligia M. Costa Pinto, Sara Sousa. Assessment of the environmental impacts associated with hydropower. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 70 (2017) 896-904

[2] Hosook Nam, Satoshi Konishi, Ki-Woo Nam. Comparative analysis of decision making regarding nuclear policy after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Accident: Case study in Germany and Japan. Technology in Society 67 (2021) 101735

[3] Shashi Kant Bhatia, Akshaya K. Palai, Amit Kumar, Ravi Kant Bhatia, Anil Kumar Patel, Vijay Kumar Thakur, Yung-Hun Yang. Trends in renewable energy production employing biomass-based biochar. Bioresource Technology. 340 (2021) 125644

[4] Enas Taha Sayed, Tabbi Wilberforce, Khaled Elsaid, Malek Kamal Hussien Rabaia, Mohammad Ali Abdelkarrem, Kyu-Jung Chae, A.G. Olab. A critical review on environmental impacts of renewable energy systems and mitigation strategies: Wind, hydro, biomass and geothermal. Science of the Total Environment 766 (2021) 144505

Запасов в России  
82 млрд. м<sup>3</sup>



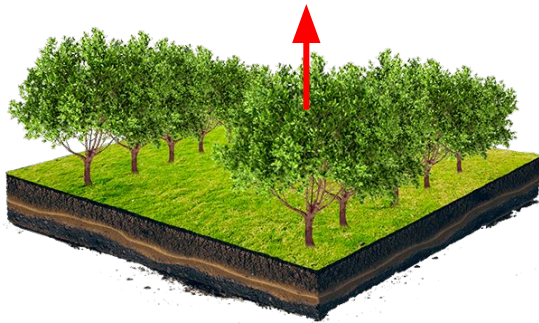
Общая тенденция производства биоэнергии с 2007 по 2017 год: ROW = Остальной мир, SA = Южная Америка, NA = Северная Америка, EU = Европейский союз [2]



**Мировое производство  
древесных гранул  
увеличилось в период  
2000–2015 гг.  
с 1,7 млн. Тонн до 36,2 млн.  
Тонн [1] (в 21 раз)**

[1] Lucio Lucadamo, Luana Gallo, Anna Corapi. Power plants: The need for effective bio-monitoring of the contribution of bio(wood) fuelled stations to atmospheric contamination. Atmospheric Pollution Research. Available online 18 September 2019

[2] REN21 Global status report <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/08/Full-Report-2018> (2018), Accessed 8th Oct 2018  
Google Scholar



**Тополь быстро растет** и выделяет довольно много кислорода. В идеальных условиях некоторые сорта могут **вырасти до 5 м за сезон в первый год** (скорость роста практически сравним со скоростью роста бамбука) [1]



## Погрешности измерений

Физическая величина	Средство измерения	Погрешность прибора
Температура окислителя ( $T_g$ )	Термический преобразователь (ТХА)	$\pm 0,004 \cdot T_g$
Расстояние между частицами топлива	<u>Photron FASTCAM CA4</u> 5	$\leq 4 \%$
Время задержки зажигания	<u>Photron FASTCAM CA4</u> 5	$\leq 5 \cdot 10^{-5} \%$

Таблица 1 - Погрешности средств измерений (систематическая погрешность)

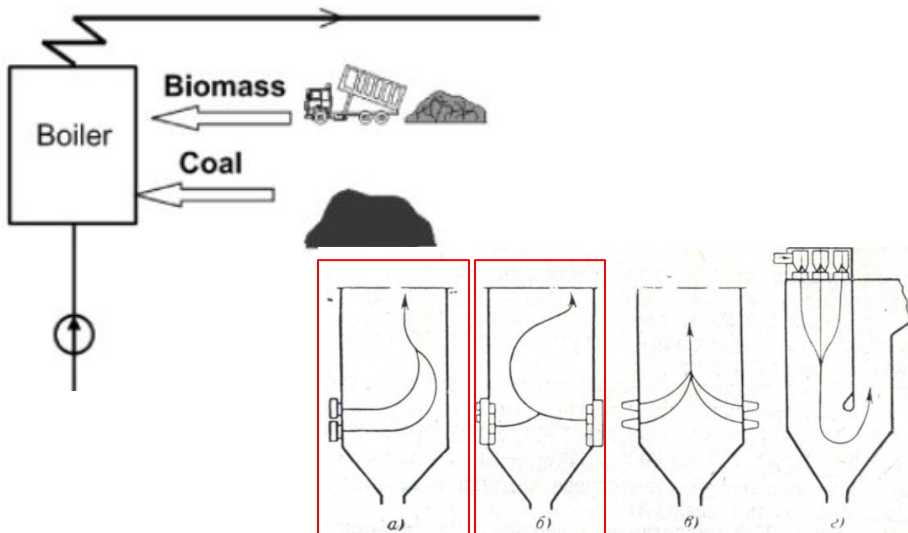
Методом статистической обработки случайной величины:

$$M[t] \rightarrow D[t] \rightarrow S_t^n \rightarrow \Delta t \rightarrow \delta$$

Погрешность (неопределенность) серии измерений времен задержки зажигания при доверительной вероятности  $\alpha=0,95$  не превышала **12%**.

*Промахи (грубые ошибки) исключались сразу.*

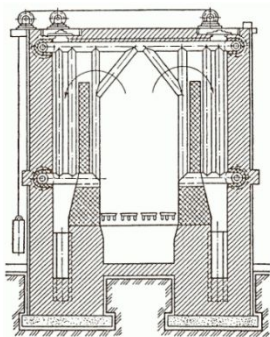
Прямое совместное сжигание является наименее дорогим, наиболее простым и наиболее часто применяемым подходом. Биомасса и уголь сжигаются в топке угольного котла с использованием одних и тех же или отдельных мельниц и горелок [1].



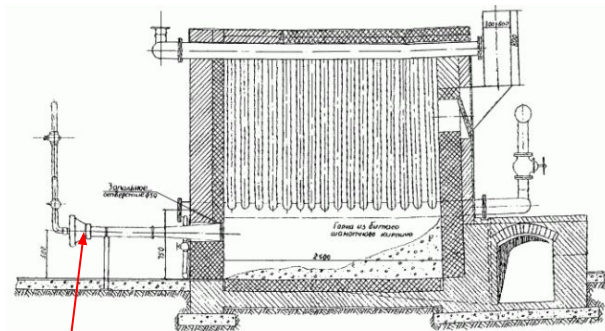
- а – фронтальным расположением горелок
- б – с угловым расположением горелок
- в – со встречной компоновкой горелок
- г – с потолочным расположением горелок

[1] Fouad Al-Mansour, Jaroslaw Zuwala. An evaluation of biomass co-firing in Europe. Biomass and Bioenergy 31 (2010) 620-629

# Стальной секционный трубчатый котёл НР-18



Поперечный разрез котла НР-18  
с пакетом из прямых труб

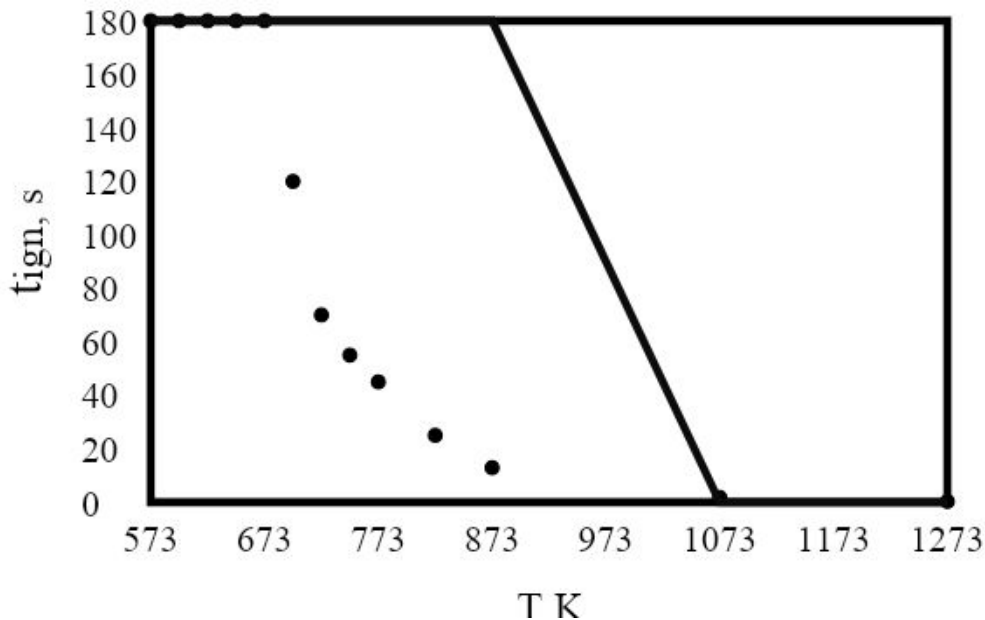


Продольный разрез котла НР-18

**Запальная горелка**







**минимальные температуры зажигания**