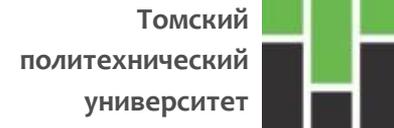




*X Международный Российско-Казахстанский симпозиум
УГЛЕХИМИЯ И ЭКОЛОГИЯ КУЗБАССА
Кемерово, 12-13 июля 2021 г.*



ГОРЕНИЕ КАПЕЛЬ СУСПЕНЗИОННЫХ ТОПЛИВ НА ОСНОВЕ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ, УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ И ОТРАБОТАННОГО ТУРБИННОГО МАСЛА

Вершинина К.Ю., Дорохов В.В., Романов Д.С.

Томский политехнический университет

30, пр. Ленина, Томск, Россия, 634050

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,
Соглашение №075-15-2020-806 (договор №13.1902.21.0014).

Актуальность исследования



Ежегодно в мире добывается около 7269 млн. т угля и около 4331 млн. т сырой нефти [1,2].

Цели применения суспензионных топлив

- Улучшение экологических параметров работы топливосжигающих установок (снижение выбросов);
- Утилизация большой группы неустойчивых компонентов и отходов.

Дополнительные цели:

- Снижение стоимости топлива;
- Возможность трубопроводной транспортировки;
 - Замещение угля и мазута;
- Улучшение условий пожаровзрывобезопасности энергетических предприятий;
 - Упрощение процедуры подготовки топлива;
- Повышение надежности и гарантированной работоспособности систем теплоэнергетики;
 - Повышение энергобезопасности конечных потребителей.



Отрасли промышленности, производящие наибольшие объемы опасных отходов [3]

[1] Coal Information. International Energy Agency. 2015. <http://www.iea.org>.

[2] BP Statistical Review of World Energy. London: BP, 2019. 48 p. <http://www.bp.com>

[3] Global Waste Management Outlook, 2015.

Цель и задачи исследования

Целью работы является изучение динамики зажигания и выгорания капель топливных суспензий, приготовленных на основе воды, угольного шлама, угольной пыли и отработанного турбинного масла.

При проведении исследований решены **следующие задачи:**

- подготовлены топливные композиции на основе смеси низкосортных компонентов ископаемого происхождения и индустриального масла;
- определены интегральные характеристики процессов зажигания и горения топливных смесей при сжигании в лабораторной печи;
- вычислены значения скоростей выгорания топливных композиций.



Компоненты топливных смесей

1. Угольный шлам
(отход флотации каменного угля);
2. Каменный уголь;
3. Отработанное турбинное масло;
4. Вода.

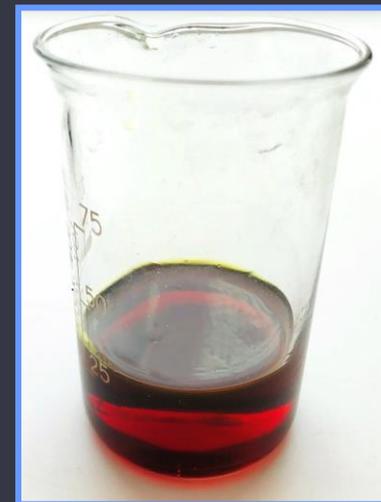


Табл. 1. Результаты технического и элементного анализов твердых компонентов топлива

Компонент	W ^a , %	A ^d , %	V ^{daf} , %	Q ^a _{sr} , МДж/кг	C ^{daf} , %	H ^{daf} , %	N ^{daf} , %	S _t ^d , %	O ^{daf} , %
Угольный шлам ¹	–	26.46	23.08	24.83	87.20	5.09	2.05	1.022	4.46
Уголь К ²	2.05	14.65	27.03	29.76	79.79	4.49	1.84	0.87	12.70

1 - обогатительная фабрика «Северная», Кемеровская обл.

2 - шахта «Березовская», Кемеровская обл.

Табл. 2. Свойства отработанного турбинного масла

Плотность при 20 °С, кг/м ³	Зольность, %	Температура вспышки, °С	Температура зажигания, °С	Теплота сгорания, МДж/кг
869	0.03	207	245	45.1

Составы топливных смесей

Угольный шлам (40÷60% масс.) + вода (40÷60% масс.)
Угольная пыль (40÷60% масс.) + вода (40÷60% масс.)

Угольный шлам (40% масс.) + вода (45÷55% масс.) + турбинное масло (5÷15% масс.)
Угольная пыль (40% масс.) + вода (45÷55% масс.) + турбинное масло (5÷15% масс.)

Уголь каменный (частица)
Угольный шлам (агломерированная частица)

Этапы выполнения экспериментальных исследований

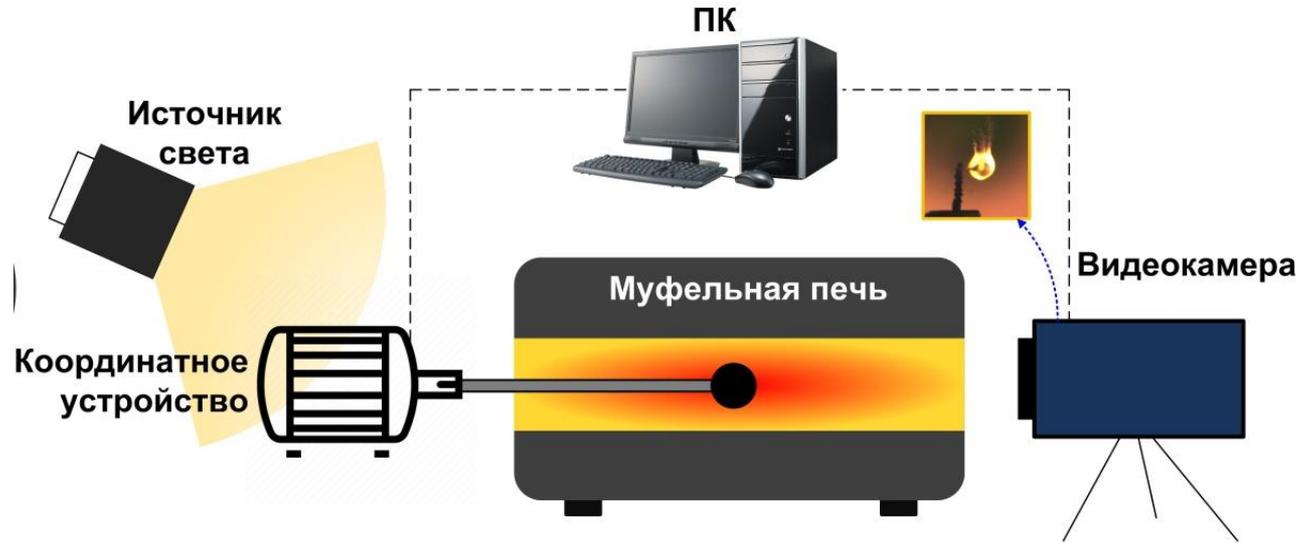


Рис. 2. Схема экспериментального стенда [1,2]

[1] Vershinina K, Strizhak P, Dorokhov V, Romanov D. Combustion and emission behavior of different waste fuel blends in a laboratory furnace. **Fuel** 2021;285. Article number 119098.

[2] Dorokhov V V., Kuznetsov G V., Nyashina GS, Strizhak PA. Composition of a gas and ash mixture formed during the pyrolysis and combustion of coal-water slurries containing petrochemicals. **Environ. Pollut.** 2021;285. Article number 117390.

Зажигание и горение топлив

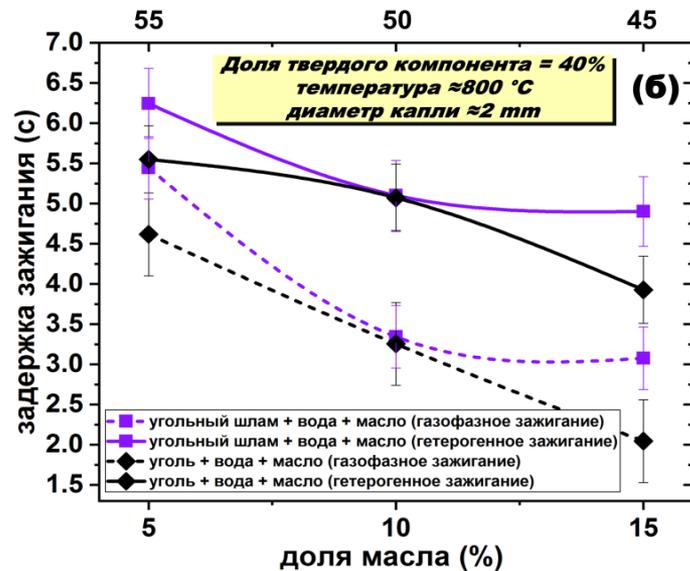
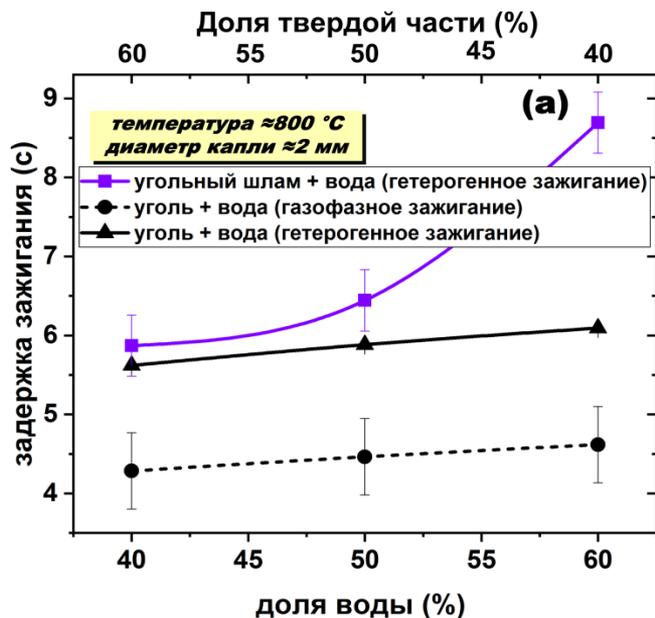
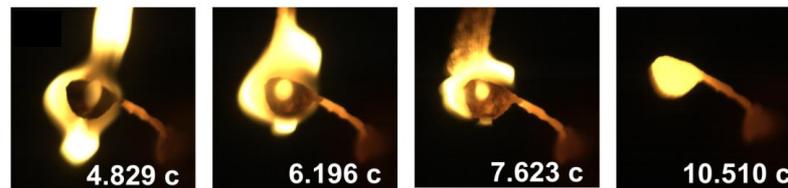
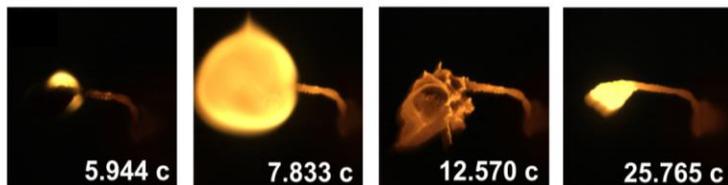


Рис. 3. Зависимости времени задержки зажигания капле суспензий от соотношения воды и твердого компонента (а) и от соотношения воды и турбинного масла (б)

Зажигание и горение топлив

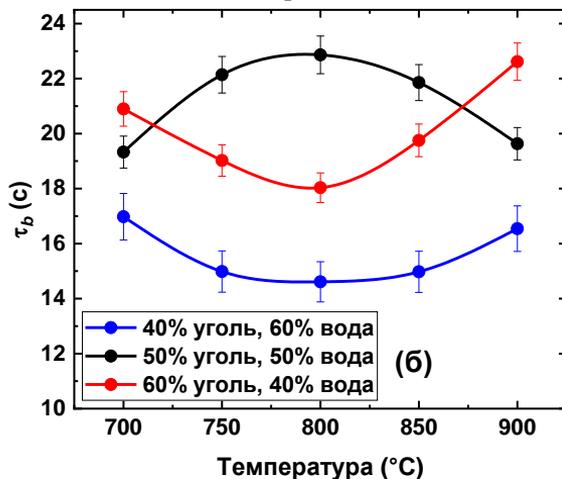
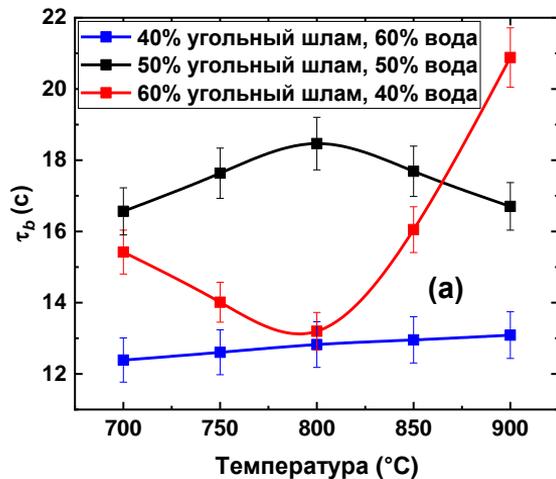


Рис. 6. Влияние температуры на длительность горения капель топлив: для суспензий на основе угольного шлама и воды (а); для суспензий на основе угольной пыли и воды (б)

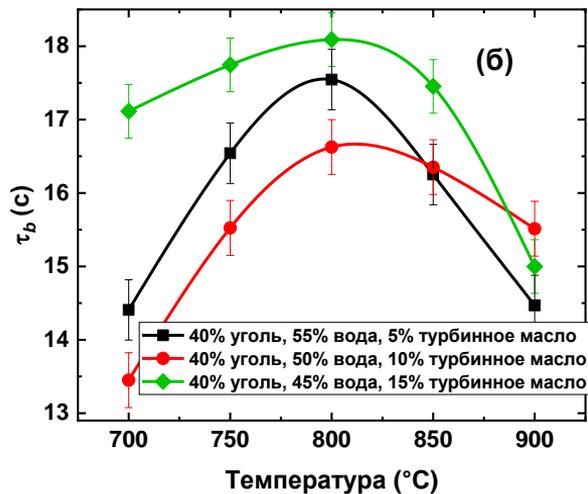
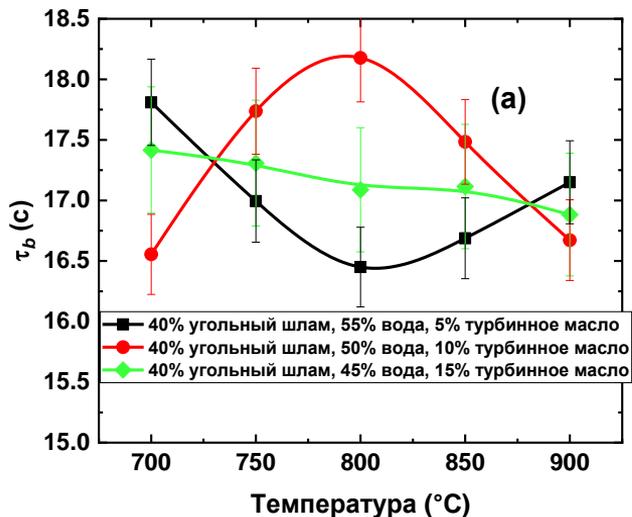


Рис. 7. Влияние температуры на длительность горения капель топлив: для суспензий на основе угольного шлама, воды и турбинного масла (а); для суспензий на основе угольной пыли, воды и турбинного масла (б)

Зажигание и горение топлив

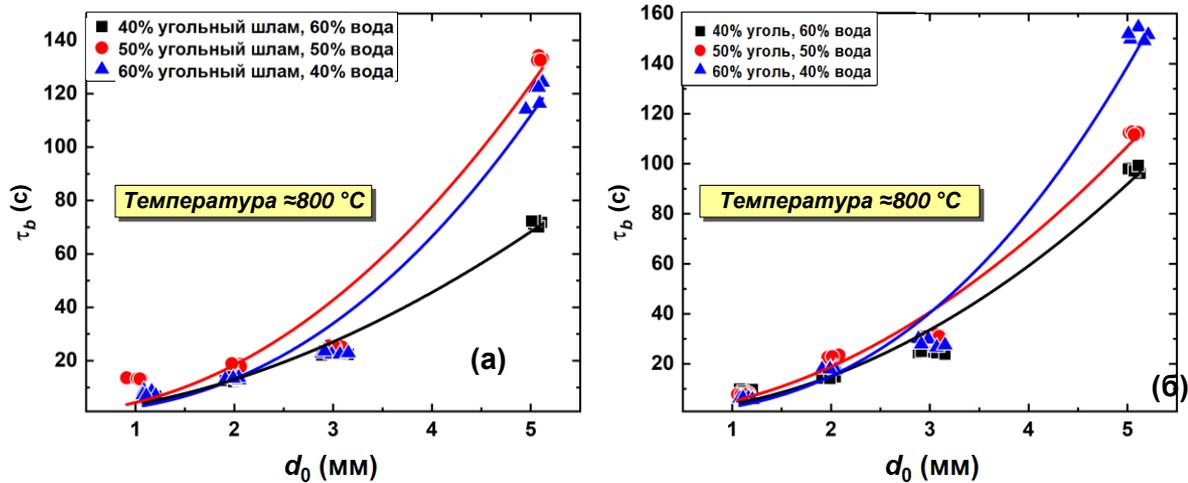


Рис. 8. Влияние начальных диаметров капель топлив на длительности горения: для топлив на основе угольного шлама и воды (а); для топлив на основе угольной пыли и воды (б)

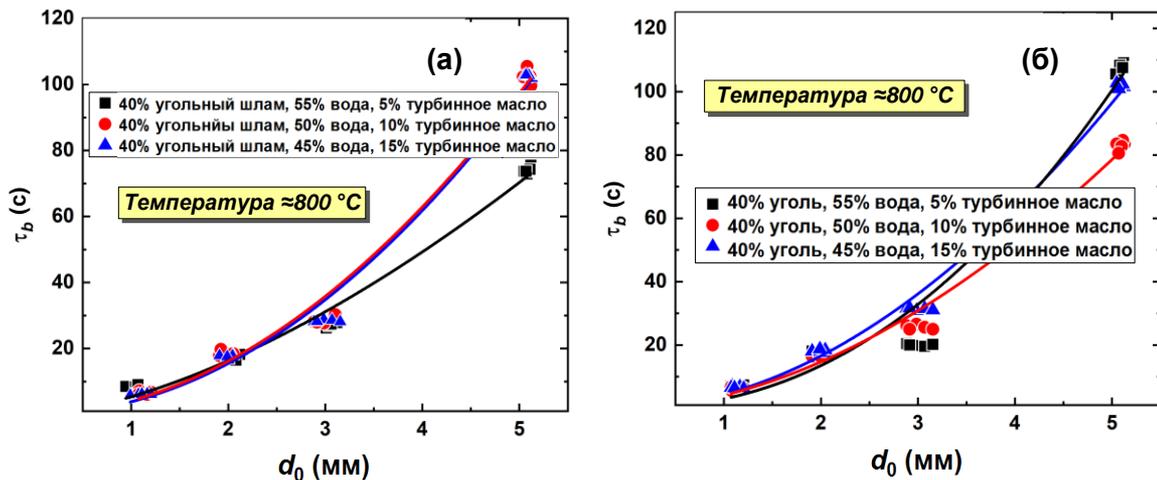


Рис. 9. Влияние температуры на длительность горения капель топлив: для суспензий на основе угольного шлама, воды и турбинного масла (а); для суспензий на основе угольной пыли, воды и турбинного масла (б)

Зажигание и горение топлив

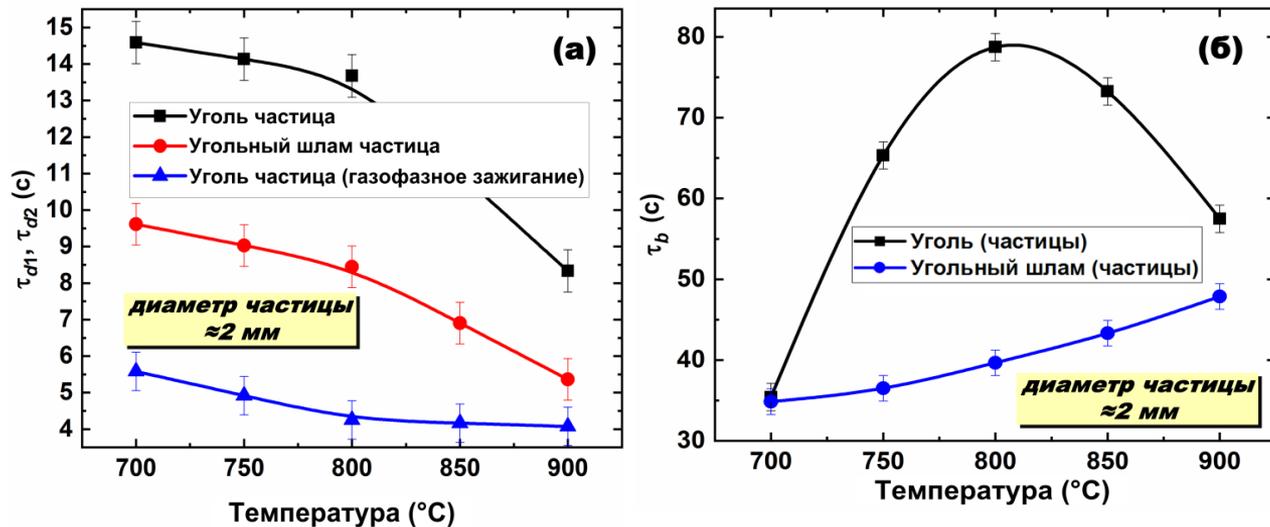
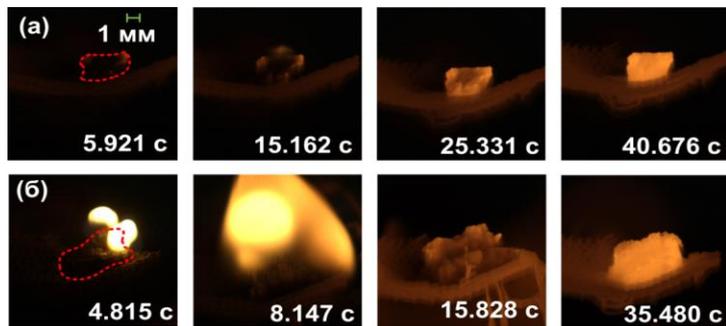


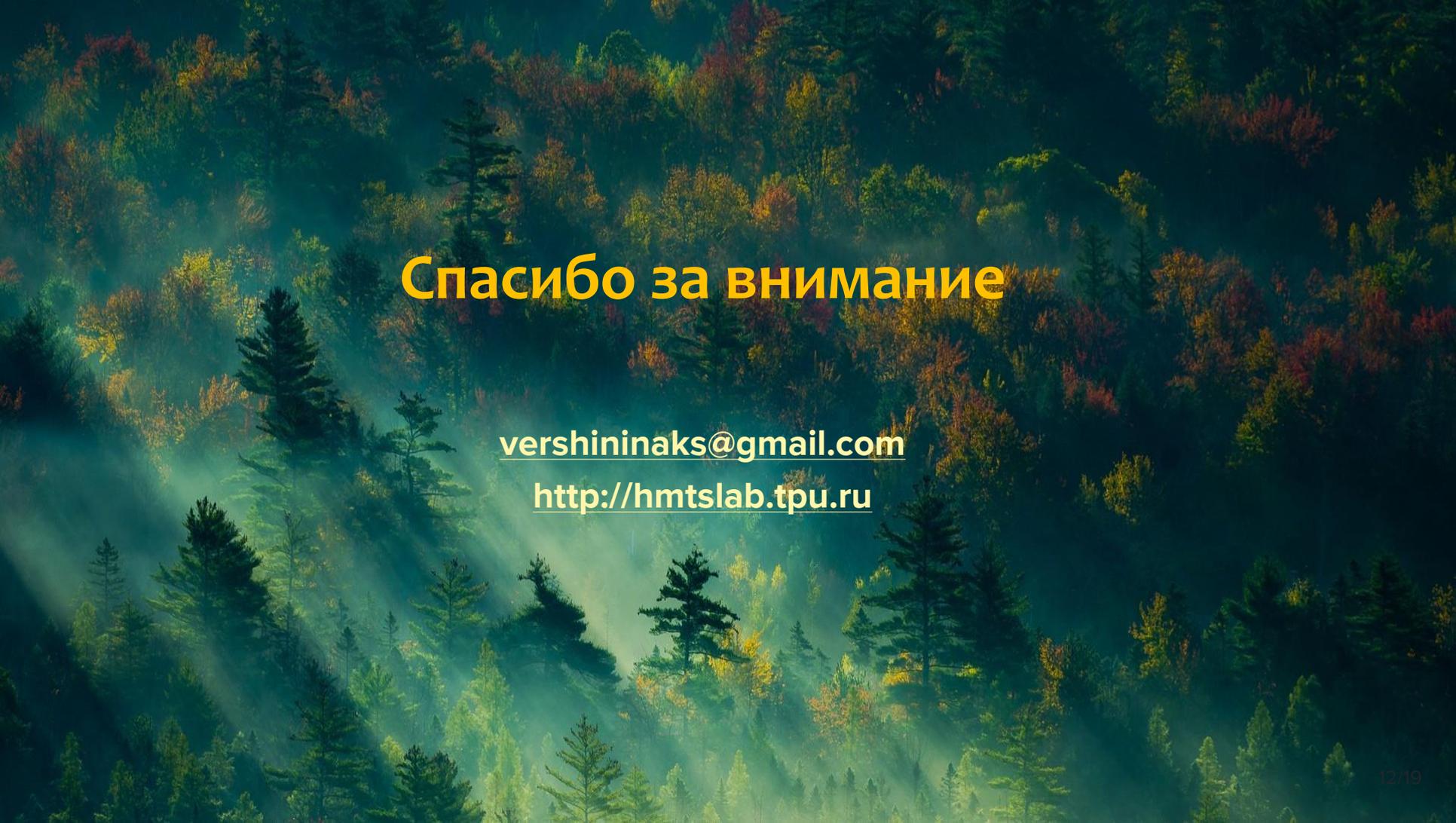
Рис. 10. Влияние температуры в печи на времена задержки зажигания (а) и длительности горения (б) частицы угля и агломерированной частицы угольного шлама



Видеокадры горения капель топлив ($T_g \approx 900$ °C, $d_0 \approx 2$ мм): а – частица угольного шлама; б – частица угля

Основные результаты и выводы

- Устойчивое газофазное горение капель смесей «угольный шлам–вода» реализуется только при значительном росте начального размера капли (до 4.5–5 мм) и увеличении температуры в печи (750–800 °С и выше).
- Добавление отработанного турбинного масла в смеси «угольный шлам–вода» интенсифицировало зажигание и выгорание капель таких топлив. При этом для заметного улучшения процесса достаточно использовать не более 5% масла.
- Инерционность зажигания и выгорания топлив возрастала многократно (в 3–8 раз) при увеличении начального размера капли от 1 мм до 5 мм. Этот результат указывает на важность контроля размера капель при их распылении для стабильного процесса горения.
- Полнота выгорания распыленных капель топливных водосодержащих смесей будет выше при температурах в печи более 800°С. При низких температурах для большинства изученных суспензий существенно замедлялось зажигание и ухудшалось горение.
- Прямое сжигание угольных шламов связано с большими технологическими проблемами вследствие неполного сгорания топлива, необходимости повышения температуры в печи, а также рисками крайне высокой скорости шлакования поверхностей нагрева. Целесообразней утилизировать угольные шламы в составе водных суспензий для улучшения интегральных характеристик технологического процесса.



Спасибо за внимание

vershininaks@gmail.com

<http://hmtslab.tpu.ru>

Используемое оборудование

- Быстроходная роторная мельница FRITSCH PULVERISETTE 14. Регулируемое число оборотов ротора 6000 - 22000 об/мин.
- Рассев лабораторный РЛ-1. Частота колебаний 200 Гц, размах колебаний 50 мм.
- Муфельная печь Nabertherm R 50/250/13 ($d=0.05$ м, $l=0.50$ м), температура контролировалась встроенной термопарой (НСХ ТХА), погрешность ± 1 °С.
- Высокоскоростная видеокамера Miro C110. Скорость видеозаписи 5040 к/с при максимальном разрешении 896×720 пикселей; размер пикселя 20 мкм; глубина изображения 12 бит; экспозиция 1 мкс; автоматический триггер по изображению.



Линейная скорость горения:

$$V_b = \frac{d_0^2}{\tau_b},$$

где d_0^2 - начальный диаметр капли, мм; τ_b - длительность горения, с.

Массовая скорость горения:

$$V_m = \frac{m_0 - m_1}{\tau_b}$$

где m_0 - начальная масса капли, кг;
 m_1 - масса несгоревшего остатка, кг; τ_b -
длительность горения, с.

Задержки газофазного и гетерогенного зажигания

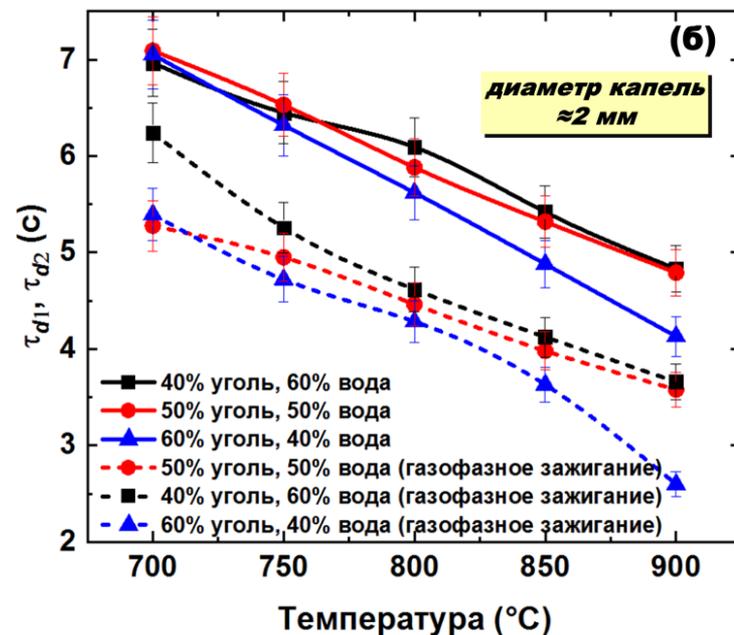
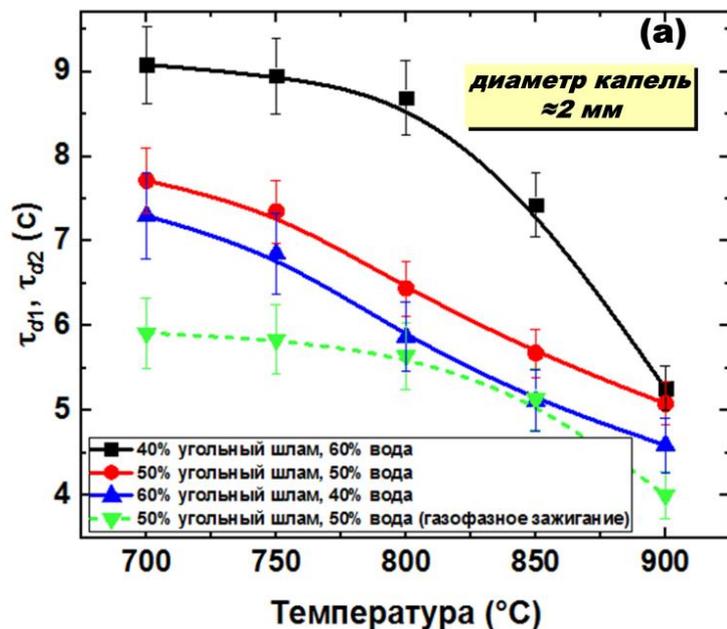


Рис. Д1. Времена задержки газофазного и гетерогенного зажигания капль топлива в зависимости от температуры в печи: для топлив на основе угольного шлама и воды (а); для топлив на основе угольной пыли и воды (б)

Задержки газофазного и гетерогенного зажигания

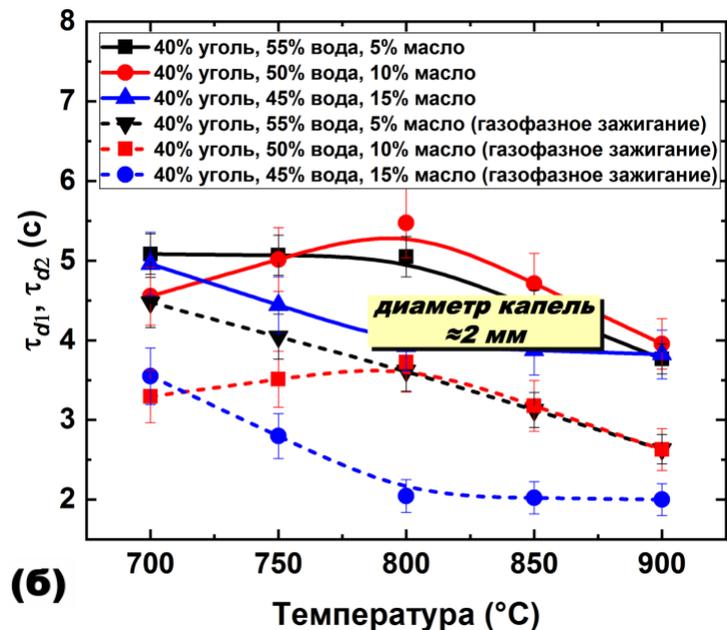
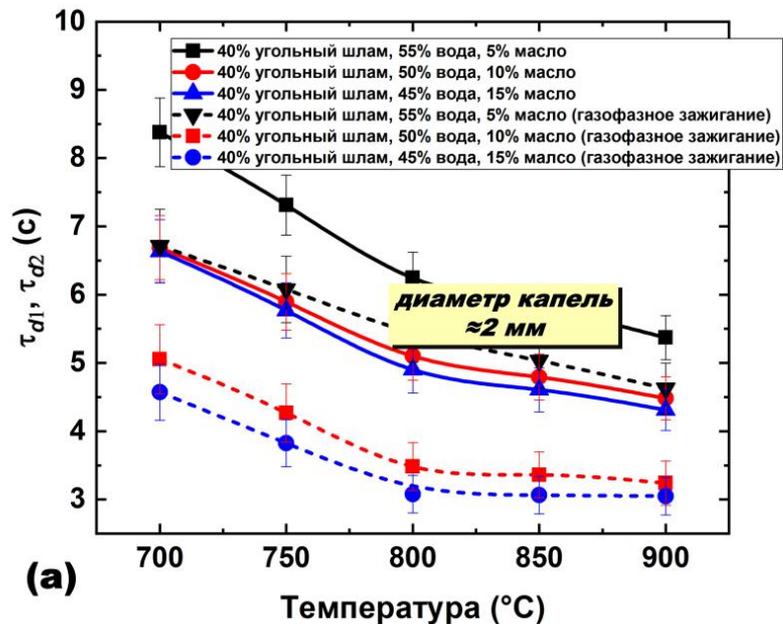


Рис. Д2. Времена задержки газофазного и гетерогенного зажигания каплей топлива в зависимости от температуры в печи:
для топлив на основе угольного шлама, воды, отработанного масла (а);
для топлив на основе угольной пыли, воды, отработанного масла (б)

Зажигание и горение топлив

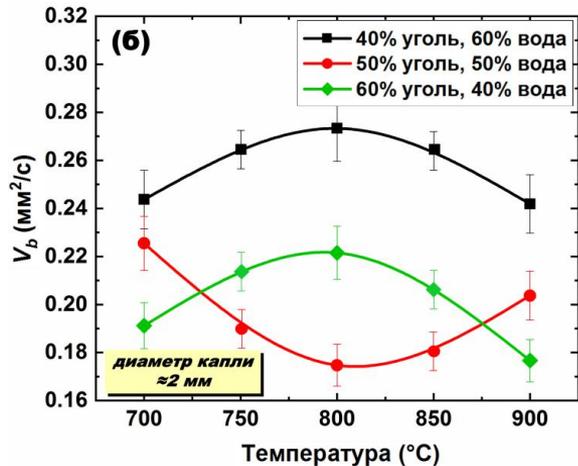
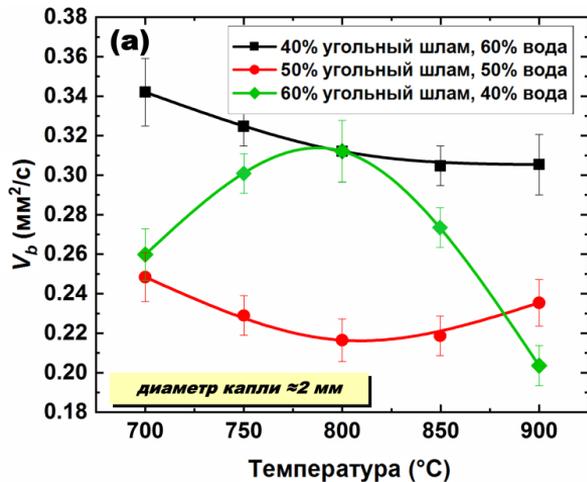


Рис. Д3. Зависимости линейной скорости выгорания капель суспензий от температуры в печи: для топлив на основе угольного шлама и воды (а); для топлив на основе угольной пыли и воды (б)

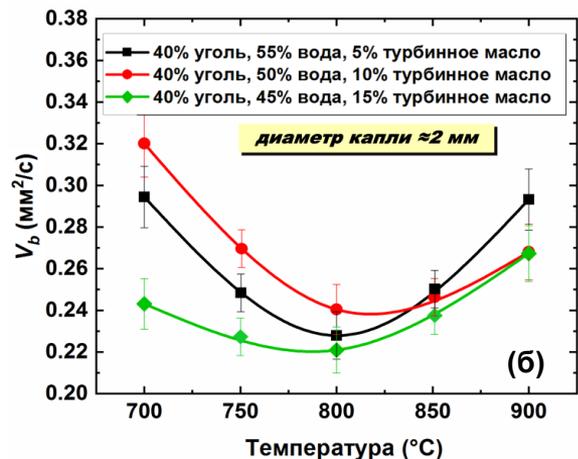
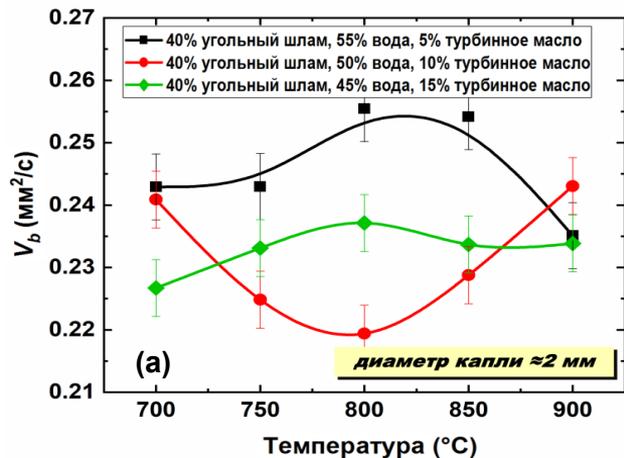


Рис. Д4. Зависимости линейной скорости выгорания капель суспензий от температуры в печи: для топлив на основе угольного шлама, воды, отработанного масла (а); для топлив на основе угольной пыли, воды, отработанного масла (б)